



**Tiago Alexandre
Aguiar Couchinho**

**Auditoria Energética a uma Instalação de
Arrefecimento Industrial**



**Tiago Alexandre
Aguiar Couchinho**

**Auditoria Energética a uma Instalação de
Arrefecimento Industrial**

Relatório de Estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica Doutor Vítor António Ferreira da Costa, Professor Associado c/ Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e sob a coorientação científica do Doutor Joaquim José Borges Gouveia, Professor Catedrático do Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da Universidade de Aveiro.

"A satisfação está no esforço e não apenas na realização final."

Mahatma Gandhi

o júri

presidente

Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho

professor auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

orientador

Prof. Doutor Vítor António Ferreira da Costa

professor associado c/ agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

arguente

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva

professor auxiliar Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Quero começar por agradecer às instituições que tornaram este estágio possível: GALP Energia, Universidade de Aveiro e CUF – Químicos Industriais.

Na Universidade de Aveiro quero deixar um agradecimento aos meus orientadores Prof. Joaquim Borges Gouveia e Prof. Vítor Costa, e também aos Profs. Fernando Neto e Miguel Oliveira, pela disponibilidade e ajuda prestada sempre que solicitados.

Na CUF-QI quero deixar um especial agradecimento às minhas orientadoras, Eng.^a Teresa Marques e Eng.^a Catarina Dias, pelo apoio e dedicação incansável e por me terem proporcionado um estágio maravilhoso, e ao Eng. David Lopes, a quem agradeço todo o interesse demonstrado. Quero deixar um abraço ao Eng. Marco Prior como forma de agradecimento por todos aqueles 10 minutos que pedi que acabavam por se tornar em muitos mais. E como o estágio não é só trabalho, quero deixar um obrigado a todos os meus colegas de almoço pela simpatia, à vontade e facilidade com que me integraram na empresa, em especial às minhas amigas Vanda Portela e Ana Vieira com quem desenvolvi uma relação de amizade que vai para além das portas da CUF-QI.

Aos meus amigos de longa data e companheiros de casa Emanuel Delgado e João Teixeira, juntam-se Inês Soares, André Santiago, Lea Lima e Irene Teixeira, a quem agradeço e retribuo toda a amizade e dedicação ao longo destes anos.

Por último, e não menos importante, à minha família que me apoiou em todos os momentos, mesmo estando eu, geograficamente, um pouco distante.

Um muito Obrigado!

palavras-chave

Eficiência energética, arrefecimento industrial, permutadores de calor, variador eletrónico de velocidade, bombas centrífugas.

resumo

Este relatório refere-se a um estágio desenvolvido na CUF – Químicos Industriais ao abrigo do programa GALP202020 em parceria com a Universidade de Aveiro.

O objetivo do estágio incidiu na auditoria energética a uma instalação de arrefecimento industrial.

Desta auditoria resultaram 4 propostas de projetos/medidas de melhoria da eficiência energética:

1. Otimização do circuito de bombagem de soda cáustica
2. Otimização do arrefecimento de soda cáustica concentrada
3. Implementação de variador eletrónico de velocidade
4. Monitorização da torre de arrefecimento

À exceção da última medida que ainda se encontra em fase de estudo e que, por essa razão, não possui dados financeiros, as restantes possuem um *payback period* inferior a 1 ano e somam no total 20.000 € de investimento. Como benefícios têm a redução conjunta de 400 MWh_e anuais, o que equivale a 190 tonCO₂eq. Esta poupança energética é conseguida, em grande parte, pela redução do caudal de água bombeado em 180 m³/h.

As 3 primeiras medidas possuem um VAL a 10 anos de 40.000 €, 78.000 € e 150.000 €, respetivamente, calculado com base num *spread* de 4,4 %, Euribor a 0,349 % e assumindo um acréscimo do preço da energia de 1,5 % ao ano.

A empresa considera realizar o investimento das duas primeiras medidas, estando a terceira em discussão. A quarta medida será alvo de trabalho posterior e com vista a ser implementada nas restantes instalações de arrefecimento.

keywords

Energy efficiency, industrial cooling, heat exchangers, variable frequency drive, centrifugal pumps.

abstract

This report refers to a developed internship in CUF – Químicos Industriais under GALP202020 program in partnership with the University of Aveiro.

The goal of the internship was focused at an industrial cooling where it was intended to perform an energy audit.

This audit resulted in four proposals projects for energy efficiency:

1. Optimization of the pumping circuit of caustic soda
2. Optimization of the cooling of concentrated caustic soda
3. Implementation of variable frequency drive
4. Monitoring of Cooling Tower

Except for the last measure that is still under study and therefore has no financial data, the remaining has a less than 1 year payback and total sum of 20.000 € investment. As benefits have joint annual reduction of 400 MWh_e, which amounts to 190 tonneCO₂eq. This energy saving is achieved, in large part, by reducing the flow rate of water pumped at 180 m³/h.

The first 3 steps have a VAL 10 years of 40,000 €, 78.000 € and 150.000 €, calculated based on a spread of 4,4 %, 0,349 % and Euribor assuming an increase in energy prices by 1,5 % per year .

The company has approved the investment of the first two steps, the third being discussed. The fourth measure is completed in a professional internship that will start next year in order to be implemented in the remaining cooling facilities and to monitor the implementation of other measures proposed.

Índice

Índice de Figuras	II
Índice de Tabelas	IV
Lista de Acrónimos	V
Nomenclatura	VI
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos do Estágio	1
1.2. Motivação.....	2
1.3. Estrutura do Documento	2
2. Caracterização da Empresa e Objeto de Estudo	3
2.1. Caracterização da CUF-Químicos Industriais.....	3
2.2. Caracterização da Instalação de Arrefecimento	7
2.2.1. Caracterização Energética	7
2.2.2. Caracterização dos Equipamentos.....	9
3. Diagnóstico da Instalação de Arrefecimento Industrial.....	11
3.1. Ponto de Partida	11
3.2. Caracterização e Metodologia.....	11
3.3. Resultados e Discussão.....	12
4. Enquadramento Teórico e Instrumentação	13
5. Estudo das Medidas de Eficiência Energética	19
5.1. Otimização do Circuito de Bombagem de Soda Cáustica	19
5.2. Otimização do Arrefecimento de Soda Cáustica Concentrada	27
5.3. Implementação de Variador Eletrónico de Velocidade	34
5.4. Monitorização da Torre de Arrefecimento.....	40
6. Conclusões.....	45
7. Bibliografia.....	47
ANEXO I – Catálogo de Variadores Eletrónicos de Velocidade ABB	48

Índice de Figuras

Figura 1 – Modelo de Negócio <i>Over-the-Fence</i>	4
Figura 2 – Esquema de <i>Inputs/Outputs</i> da PCA.....	5
Figura 3 – Esquema de <i>Inputs/Outputs</i> da PAD.....	5
Figura 4 – Distribuição do consumo de energia elétrica nos serviços auxiliares e nos refrigerantes	8
Figura 5 – Distribuição do consumo de água bruta	8
Figura 6 – Esquema de um circuito de arrefecimento industrial [2]	9
Figura 7 – Esquema dos circuitos do Refrigerante 4.....	9
Figura 8 – Refrigerante 4	10
Figura 9 – Tipologia das torres de arrefecimento em estudo [2].....	10
Figura 10 – Ciclo típico de funcionamento de uma bomba centrífuga [6]	14
Figura 11 – Variação da eficiência das bombas centrífugas [6]	14
Figura 12 – Leis da afinidade das bombas centrífugas [6]	14
Figura 13 – Ponto de funcionamento do circuito [6]	15
Figura 14 – Redução de caudal por estrangulamento [6].....	15
Figura 15 – Ponto de funcionamento por redução de velocidade da bomba [6]	15
Figura 16 – Comparação de potências dos vários métodos de regulação de caudal [6] ..	15
Figura 17 – Distribuição das zonas de acumulação de detritos nas placas do permutador	16
Figura 18 – Caudalímetro Katronic KATflow 230	17
Figura 19 – Termómetro de Infravermelhos Fluke 60.....	18
Figura 20 – Analisador de Energia Fluke 435	18
Figura 21 – <i>Dashboard</i> do circuito de processamento de soda.....	20
Figura 22 – Identificação das linhas a alterar e a eliminar.....	23
Figura 23 – Proposta de alteração do circuito de processamento de soda	23
Figura 24 – Resultados do teste de alteração do circuito de processamento de soda na potência ativa do grupo eletrobomba P08.11	25
Figura 25, 26 e 27 – Distribuição das zonas de acumulação de detritos nas placas do permutador E08.09	28
Figura 28 – Histograma do caudal de soda cáustica concentrada a 50 % produzida em 2013	29
Figura 29 – Desempenho do permutador de calor E08.09 antes e depois da substituição de 12 de Março.....	30
Figura 30 – Desempenho do permutador de calor E08.09 antes e depois da substituição de 29 de Julho	30
Figura 31 – Configuração do circuito com dois permutadores de calor em paralelo.....	31
Figura 32 – Funcionamento dos permutadores de calor em função do caudal de soda cáustica	32
Figura 33 – Funcionamento dos permutadores de calor com base em dois regimes de produção.....	33
Figura 34 – Monitorização da potência ativa consumida e caudal de água do circuito AGC	36
Figura 35 – Dados de entrada para a 1ª simulação	37

Figura 36 – Dados de entrada para a 2ª simulação	37
Figura 37 – Resultados da 1ª simulação	38
Figura 38 – Resultados da 2ª simulação	38
Figura 39 – Monitorização da potência ativa consumida e caudal de água do circuito SODA	39
Figura 40 – Distribuição da queda de água.....	41
Figura 41 – Estado de conservação do enchimento.....	41
Figura 42 – Monitorização das condições de funcionamento da torre de arrefecimento em 2013	42
Figura 43 – Monitorização Ventilador 1	43
Figura 44 – Monitorização Ventilador 2.....	43
Figura 45 – Monitorização Ventilador 3.....	43
Figura 46 – Monitorização Ventilador 4.....	43
Figura 47 – Resumo dos resultados das medidas propostas	46

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Aplicabilidade dos produtos da CUF-QI	5
Tabela 2 – Condições de projeto dos grupos eletrobomba	10
Tabela 3 – Resumo do diagnóstico da instalação de arrefecimento, propostas de intervenção e seus benefícios.....	12
Tabela 4 – Estudo da influência da redução do caudal de operação na tensão de corte nos canais de um permutador de placas realizado por um fabricante de permutadores de calor.....	16
Tabela 5 – Condições de funcionamento de projeto vs atuais do permutador de calor E08.12	22
Tabela 6 – Análise do consumo energético no ano 2013 e perspectivas de redução	26
Tabela 7 – Carga de funcionamento de cada um dos permutadores de calor para as diversas combinações de caudais de funcionamento da instalação.....	32

Lista de Acrónimos

AIPQR – Associação das Indústrias da Petroquímica, Química e Refinação

CO₂ – Dióxido de Carbono

ETA – Estação de Tratamento de Águas

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

HR – Humidade Relativa

I&D – Investigação e Desenvolvimento

IPAC – Instituto Português de Acreditação

LCV – Válvula de Controlo por Nível

MDI – Diisocianato de Difenilmetano

PACOPAR – Painel Consultivo Comunitário do Programa Atuação Responsável

PAD – Produção Anilina e Derivados

PCA – Produção Cloro Álcalis

PVC – Policloreto de Vinil

TBH – Temperatura de Bolbo Húmido

TBS – Temperatura de Bolbo Seco

TCV – Válvula de Controlo por Temperatura

TT – Transmissor de Temperatura

VAL – Valor Atual Líquido

VEV – Variador Eletrónico de Velocidade

Nomenclatura

A – Área	[m ²]
c_p – Calor específico	[J/kg. K]
D_e – Diâmetro exterior	[m]
h_e – Coeficiente de transferência de calor por convecção exterior	[W/m ² . °C]
HR – Humidade relativa	[%]
L – Comprimento	[m]
\dot{m} – Caudal mássico	[kg/s]
P – Potência elétrica	[W]
\dot{Q} – Potência térmica	[W]
t_{in} – Temperatura da água à entrada do permutador	[°C]
t_{out} – Temperatura da água à saída do permutador	[°C]
T_1 – Temperatura inicial	[°C]
T_2 – Temperatura final	[°C]
T_{amb} – Temperatura ambiente	[°C]
T_f – Temperatura do fluido	[°C]
T_{in} – Temperatura do processo à entrada do permutador	[°C]
T_{out} – Temperatura do processo à saída do permutador	[°C]
T_{se} – Temperatura da superfície exterior	[°C]
TBS – Temperatura de Bolbo Seco	[°C]
TBH – Temperatura de Bolbo Húmido	[°C]
U_e – Coeficiente global de transferência de calor exterior	[W/m ² . °C]
\dot{V} – Caudal Volúmico	[m ³ /s]
\dot{V}_{H_2O} – Caudal volúmico de água	[m ³ /h]
\dot{V}_{NaOH} – Caudal volúmico de soda cáustica	[m ³ /h]
ΔP – Perda de carga	[Pa]
ΔT_{lm} – Diferença média logarítmica de temperaturas	[°C]

1. Introdução

A utilização eficiente da energia é essencial para a competitividade económica de uma empresa e de um país. A economia portuguesa caracteriza-se por possuir uma intensidade energética e uma intensidade carbónica elevadas, e uma dependência muito elevada da importação no que concerne ao consumo de energia primária. Esta dependência energética, e muito em especial do petróleo e gás natural, faz com que a subida do preço destas matérias, nos últimos anos, se manifeste na perda de competitividade das empresas portuguesas, e em especial naquelas que se encontram no mercado internacional, como é o caso da CUF-Químicos Industriais. [1]

A CUF-Químicos Industriais é uma empresa consumidora intensiva de energia e uma referência no competitivo mercado de produção de Cloro e Anilina, estando em concorrência direta com empresas inseridas em países onde os custos energéticos são inferiores. Desta forma, a CUF-QI vê-se forçada a reduzir consumos específicos de forma a manter a sua competitividade neste mercado.

1.1. Objetivos do Estágio

Aumentar a eficiência energética é uma das formas de aumentar a competitividade de uma empresa, mantendo ou mesmo aumentando os níveis de produção com um menor consumo de recursos, ou seja, diminuindo o consumo energético específico. O objetivo deste estágio é a realização de uma auditoria energética a uma instalação de arrefecimento industrial, construída em 2001 sobre um paradigma em que o consumo de energia não era uma preocupação, tornando-se essencial a alteração do *MindSet*, promovendo a eficiência energética e a racionalização de consumos de energia elétrica, água bruta e emissões carbónicas.

A instalação de arrefecimento industrial identificada é a maior consumidora, tanto de água bruta como de energia elétrica, 43% e 30% respetivamente, das cinco instalações da fábrica PCA – Produção Cloro Álcalis, tendo um potencial de poupanças superior, motivo pelo qual foi escolhida para ser alvo de estudo deste estágio.

Com este estágio pretende-se analisar as condições de funcionamento da instalação e identificar pontos onde seja possível, e economicamente viável, a implementação de medidas para a redução de consumos. É também pretendido identificar o ponto crítico de funcionamento dos equipamentos de forma a garantir o bom funcionamento e melhorar a eficiência energética global. Tudo isto culmina no objetivo comum de criar uma metodologia aplicável às outras instalações de arrefecimento.

À empresa pretendo apresentar um conjunto de medidas passíveis de melhorar a eficiência energética dos equipamentos e instalações, que melhorem as condições de funcionamento e facilitem as operações, com um período de retorno inferior ao máximo estipulado pela empresa.

1.2. Motivação

A nível pessoal, este trabalho irá transmitir-me uma visão real de como funciona uma indústria consumidora intensiva de energia, e quais as principais preocupações e as limitações e dificuldades que se poderão encontrar numa auditoria energética. Os conceitos teóricos por norma são transversais a toda a indústria, no entanto a aplicabilidade, os problemas e formas de os resolver são diferentes de indústria para indústria, e muitas vezes é a experiência profissional que faz a diferença na rapidez e precisão na resolução de problemas. Desta forma, mais do que um conjunto de medidas que pretendo propor, é a experiência que pretendo reter deste estágio.

1.3. Estrutura do Documento

Relativamente à organização do relatório, este inicia-se no Capítulo 2 com uma caracterização geral da empresa e com uma caracterização do objeto de estudo, a instalação de arrefecimento industrial, a nível energético e de equipamentos.

Segue-se o Capítulo 3 que diz respeito à primeira abordagem à instalação, onde foram analisados e caracterizados todos os equipamentos através da recolha de informação sobre o modo de funcionamento da instalação, e de todos os processos associados, para determinar todas as suas necessidades e perceber de que forma estas podem afetar a produção. Com esta análise pretende-se identificar equipamentos onde seja possível aplicar medidas de redução e racionalização de consumos, que serão estudadas a nível de viabilidade económica e a nível processual, no Capítulo 5.

No Capítulo 4 é feito um enquadramento teórico dos conceitos fundamentais associados às medidas propostas, nomeadamente, o modo de funcionamento de uma torre de arrefecimento, os conceitos associados a variadores eletrónicos de velocidade e a origem dos problemas evidenciados nos permutadores de calor. Neste capítulo é ainda referida a instrumentação utilizada e a metodologia das medições.

Como já referido, do Capítulo 3 resultam 4 medidas de eficiência energética em estudo pormenorizado no Capítulo 5, onde cada medida está desenvolvida e subdividida em quatro pontos: resumo, ponto de partida; caracterização e metodologia e resultados e discussão.

- 5.1. Otimização do circuito de bombagem de soda cáustica
- 5.2. Otimização do arrefecimento de soda cáustica concentrada
- 5.3. Implementação de variador eletrónico de velocidade (VEV)
- 5.4. Monitorização da torre de arrefecimento

Por fim, temos as Conclusões, onde se encontra um resumo dos resultados de todas as medidas propostas, os pontos-chave atingidos com o desenvolvimento do estágio e um conjunto de sugestões de trabalhos futuros.

Por questões de confidencialidade, diversos dados não puderam integrar este documento, e em especial, a informação que deu origem ao Capítulo 3.

2. Caracterização da Empresa e Objeto de Estudo

2.1. Caracterização da CUF-Químicos Industriais

Atualmente a CUF-QI é a empresa do Grupo José de Mello que atua na área dos químicos industriais evidenciando um elevado potencial de crescimento onde é uma referência na produção de cloro e anilina.

A CUF-QI situa-se no complexo químico de Estarreja, e detém participações num conjunto de cinco empresas ligadas à indústria química, e ainda uma empresa de nanotecnologia, a Innovnano. O grupo químico apresentou no ano de 2012 um volume de negócios de 320 milhões de euros com um número médio de 335 efetivos. A produção de químicos industriais distribui-se pelas empresas:

1. CUF-QI – Produção e comercialização de químicos industriais
2. AQP – Produção de Sais de Alumínio
3. ELNOSA – Produção e comercialização de cloro e produtos derivados
4. NUTRIQUIM – Produção e comercialização de Fosfato de Dicalcício
5. RENOESTE – Extração e purificação de sal

A CUF-QI tem como missão garantir a plena satisfação dos acionistas, clientes, fornecedores da empresa, através do seu crescimento e melhoria contínua, fruto da contribuição individual e do trabalho em equipa, de modo a ocupar um lugar proeminente no sector da Indústria Química.

Como visão a CUF-QI pretende ser um grupo competitivo de excelência, gerando valor no mercado global através da criação de produtos químicos que contribuam para um mundo melhor.

Como organização a CUF-QI promove o desenvolvimento e a participação dos seus colaboradores, garantindo formação contínua e diversificada, tendo consciência de que a sustentabilidade futura da empresa passa pelo incremento das competências necessárias à constante inovação. Para consolidar esta ideia, a Política de Recursos Humanos passa por atrair, desenvolver e reter as melhores pessoas, contribuir para a consecução dos objetivos definidos pela empresa e incentivar a melhoria contínua dos processos e das pessoas. Desta forma, criou em 2005 o projeto COLOMBO, um concurso interno de ideias aberto a todos os colaboradores, com o objetivo de os sensibilizar para a importância da Inovação no local de trabalho. A CUF-QI acredita que a cooperação de todos e a partilha de experiências permitirão ao Grupo atingir os seus objetivos e aumentar a criação de valor.

A CUF-QI foi uma das empresas químicas fundadoras do PACOPAR, um fórum de diálogo permanente, onde as empresas do Pólo Químico de Estarreja e os representantes da comunidade local debatem as questões de Segurança, Saúde, Ambiente e Educação, partilhando informação e preocupações. Através deste programa, obteve em 2005 o Prémio Europeu de Atuação Responsável.

Em 2007, a CUF-QI ganhou o Prémio da Academia de Engenharia, em reconhecimento da sua excelência, competitividade internacional, inovação e respeito pelo ambiente.

A CUF-QI faz ainda parte da AIPQR (Associação das Indústrias da Petroquímica, Química e Refinação), onde desempenha um importante papel dinamizador, de que fazem parte empresas, centros de I&D e Universidades em seis *clusters* das Indústrias da Refinação, Petroquímica e Química Industrial.

Modelo de Negócio

A CUF-QI juntamente com a Air Liquide e a DOW, empresas do polo químico de Estarreja, adota o modelo de negócio *Over-the-Fence* (Figura 1), com o objetivo de beneficiar a própria empresa, os parceiros e os clientes. Este modelo de negócio de fornecimento híbrido conjuga os benefícios da integração e customização típicas dos fornecedores internos, com as vantagens de acesso aos preços e regras de mercado dos fornecedores externos.

Neste modelo de negócio existe um objetivo comum das empresas que dele fazem parte, e para o qual todas trabalham: neste caso esse objetivo é um produto, o MDI. Este modelo tem como base o efeito de sinergia, em que o resultado do todo coletivo é maior que a soma das partes quando trabalhadas individualmente. Desta forma os contratos de fornecimento são de longa duração, com quantidades e preços definidos desde o início, permitindo níveis de risco controlados.

Com esta estratégia, em que certas empresas do grupo são simultaneamente fornecedoras e clientes, cada operador tende a concentrar todos os seus recursos na atividade onde é realmente eficiente, que se constitui como seu *core business*.

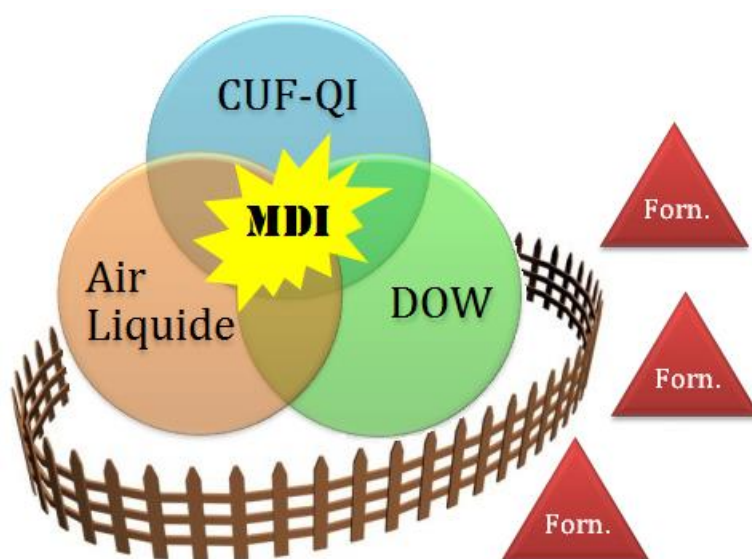


Figura 1 – Modelo de Negócio *Over-the-Fence*

Produtos e Serviços

A CUF-QI possui duas instalações fabris no Pólo Químico de Estarreja: PCA – Produção Cloro Alcalis (Inorgânicos), para a produção de Cloro, Ácido Clorídrico, Soda Cáustica, Hipoclorito de Sódio e Hidrogénio (Figura 2); e PAD – Produção Anilina e derivados (Orgânicos), para a produção de Anilina, Ácido Nítrico, Ácido Sulfanílico e Mononitrobenzeno (Figura 3). No caso do Hidrogénio, este um produto da PCA que será consumido como matéria-prima pela PAD para a produção de Anilina. Sendo assim, o Hidrogénio junta-se ao Benzeno, Amoníaco e Cloreto de Sódio como principais matérias-primas deste complexo químico.



Figura 2 – Esquema de Inputs/Outputs da PCA

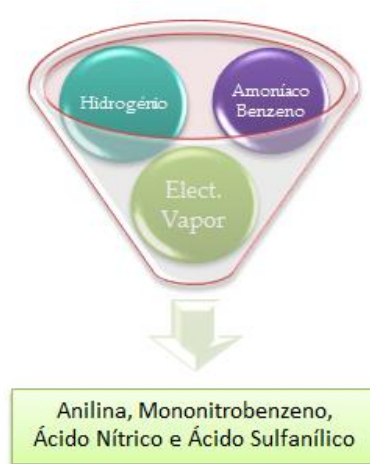


Figura 3 – Esquema de Inputs/Outputs da PAD

A diversidade de aplicações do portefólio de produtos da CUF-QI é muito variada, inclusive dentro do mesmo produto existe uma polivalência de aplicabilidade que é transversal a diversos tipos de indústria. A Tabela 1 mostra alguns dos principais destinos de cada um dos produtos produzidos pela CUF-QI, com o respetivo *ranking* referente ao volume de vendas.

Tabela 1 – Aplicabilidade dos produtos da CUF-QI

RANK	PRODUTO	APLICAÇÕES
1	Anilina	Fabrico de MDI, indústria das borrachas, pigmentos e tintas, fibras especiais
2	Soda Cáustica	Indústria química, têxtil, celulose, alimentar, sabões e detergentes
3	Cloro Liquido	Fabrico de PVC, poliuretanos, tratamento de águas
4	Mononitrobenzeno	Fabrico de Anilina, indústria química e farmacêutica
5	Hipoclorito	Tratamento de águas, produtos de higiene e limpeza, branqueamento têxtil.

Nas instalações existem laboratórios devidamente equipados, onde é efetuado o controlo analítico dos processos produtivos e realizado o controlo de qualidade dos produtos acabados. O laboratório de cloro-álcalis está acreditado pelo IPAC, para determinação de metais em águas naturais e efluentes. Este serviço é também prestado para outras empresas.

A CUF-QI presta ainda os seguintes serviços de assistência técnica aos seus clientes e fornecedores de modo a evoluir em Qualidade, Ambiente e Segurança:

- Ações de formação e aconselhamento na manipulação e utilização dos produtos químicos.
- Auditorias técnicas.
- Auditorias às instalações do cliente.
- Manutenção e reparação de recipientes para o transporte de cloro.

Mercado, Clientes e Comunicação

Os produtos da CUF-QI destinam-se a setores tão diversos como os da indústria química, farmacêutica, alimentar, têxtil, tratamento de água e papel.

A CUF-QI tem um posicionamento muito competitivo, ocupando o topo do mercado europeu tanto a nível de produção como de vendas de Anilina e Derivados, onde possui grandes volumes de vendas e poucos clientes, enquanto a produção de Cloro Álcalis se destina a um grande número de clientes do mercado ibérico:

- 6º Produtor de Anilina e 2º em vendas;
- 5º Produtor de Mononitrobenzeno e 1º em vendas;
- 1º Produtor de Ácido Sulfanílico puro.
- 3º Produtor de Cloro;

A CUF-QI chega à Europa central através da Bélgica, onde possui um centro logístico estrategicamente colocado, próximo dos seus maiores clientes Europeus: Bélgica, Holanda, Alemanha e Eslováquia.

O transporte, tanto entre clientes como fornecedores, é maioritariamente efetuado por via marítima (através do porto de Aveiro), por via ferroviária (vagão cisterna) ou por transporte rodoviário (camião cisterna). Dentro do Pólo de Estarreja as trocas são realizadas através de *pipeline*.

A produção da CUF-QI responde ao mercado produzindo de acordo com as necessidades dos clientes. Dadas as relações muito próximas existentes entre as empresas do Pólo o fluxo de produtos é contínuo e gerido em tempo real.

Recursos-Chave

Como recursos chave a CUF detém *know-how* e experiência no ramo da indústria química com quase 150 anos de história, recursos humanos altamente qualificados e uma política de melhoria contínua que assegura a qualidade dos seus produtos. Sendo detentora de inúmeras patentes e de propriedade intelectual bastante valiosa, posiciona-se na vanguarda da indústria química.

Parceiros-Chave

Na cadeia de produção de MDI, cada uma das empresas, Air Liquide, CUF-QI e DOW desempenham um papel fundamental e de certa forma insubstituível para a obtenção do produto final. Como tal são considerados parceiros chave estas entidades, que em conjunto com a CUF-QI trabalham para um mesmo objetivo, mas cada uma com o seu produto e função.

Fontes de Receita e Estrutura de Custos

A estrutura de custos da CUF-QI prende-se essencialmente com a aquisição das matérias-primas e da energia necessária para o seu processamento de modo a acrescentar-lhes valor, obtendo os produtos pretendidos pelos seus clientes. Paralelamente a estes, mas fundamentais, são os custos inerentes com todas as infraestruturas das instalações, recursos humanos, equipamentos de *backup* e manutenção.

2.2. Caracterização da Instalação de Arrefecimento

2.2.1. Caracterização Energética

A CUF-QI, constituída pelas duas instalações fabris, PAD - Produção Anilina e Derivados e PCA - Produção de Cloro Álcis, é uma consumidora intensiva de energia elétrica, recebendo-a em alta tensão nas suas subestações transformadoras, de onde posteriormente a distribui pelas duas fábricas. Nesta análise, para efeitos de enquadramento energético, foi considerado apenas o consumo de energia da fábrica PCA, onde se encontra instalado o Refrigerante 4 (designação adotada para a instalação de arrefecimento objeto de estudo).

O consumo de energia é dividido em produção e em energia para serviços auxiliares. Nestes serviços auxiliares constam todos os motores, bombas, compressores, iluminação, entre outros equipamentos consumidores de energia elétrica. A produção é responsável pelo consumo de 85 % de toda a energia elétrica da fábrica PCA. Os restantes 15 % dizem respeito aos serviços auxiliares, consumidos em baixa tensão.

Para analisar a distribuição dos consumos de energia elétrica, os consumidores dos serviços auxiliares foram agrupados por diferentes áreas:

- Processos: consumidores associados aos vários processos produtivos;
- Refrigerantes: consumidores associados às torres de arrefecimento;
- Frigoríficos: consumidores associados ao arrefecimento frigorífico;
- Ar Comprimido: consumidores associados à produção de ar comprimido;
- ETAR: consumo associado à estação de tratamento de águas residuais;

Desta forma, e com base no ano de 2013, os consumidores dos processos são responsáveis por 64 % do consumo associado às utilidades. Os refrigerantes absorvem 20 % dessa energia, que corresponde a $\frac{2}{3}$ do global das necessidades de arrefecimento da fábrica PCA, refrigerantes mais frigoríficos. A distribuição dentro dos cinco refrigerantes é relativamente equilibrada entre os refrigerantes 3, 4 e 5, sendo o grupo em análise o maior consumidor, com 29 % (Figura 4).

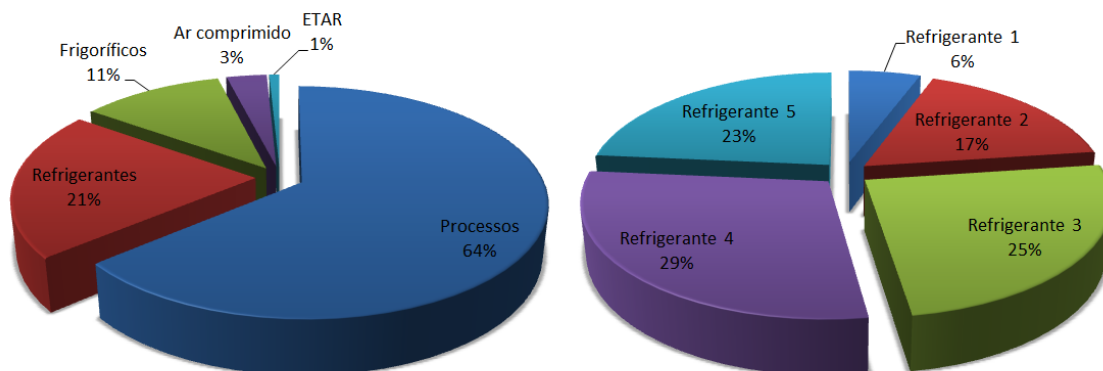


Figura 4 – Distribuição do consumo de energia elétrica nos serviços auxiliares e nos refrigerantes

Para além da energia elétrica é de extrema importância a análise do consumo de água bruta. Tratando-se de processos de arrefecimento que recorrem ao processo evaporativo para remover calor, existem perdas de água para a atmosfera que têm de ser compensadas com a reposição contínua de água bruta, denominada por *make up*.

Como se trata de uma indústria química que produz diversas soluções, existem na fábrica inúmeros consumidores de água. No entanto, enquanto que os refrigerantes consomem água bruta proveniente da ETA, estes consumidores necessitam de água desmineralizada. Desta forma, a distribuição de água bruta foi repartida pelos refrigerantes, pela instalação de desmineralização de água e por outros pequenos consumidores. Com base nos dados referentes a este ano (2014), até à presente data, os refrigerantes são responsáveis por 23 % do consumo de água bruta da fábrica PCA, 43 % da qual é consumida no refrigerante 4. A desmineralização de água absorve sensivelmente $\frac{3}{4}$ do total do consumo de água bruta (Figura 5).

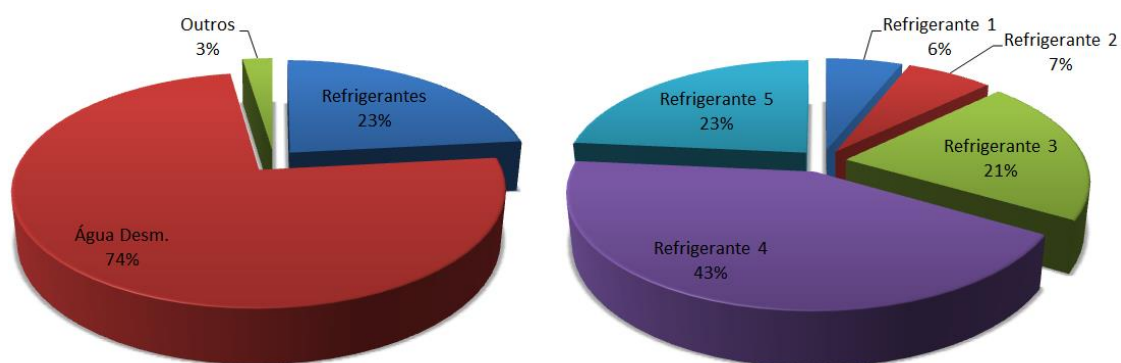


Figura 5 – Distribuição do consumo de água bruta

2.2.2. Caracterização dos Equipamentos

Um circuito de arrefecimento industrial é constituído essencialmente por três componentes: um conjunto de permutadores de calor, onde se realizam as trocas térmicas entre os produtos a arrefecer e a água; uma torre de arrefecimento evaporativa, onde ocorre a remoção de calor da água através da evaporação de uma parte desta; e um sistema de bombagem, que faz circular a água entre os permutadores de calor e a torre de arrefecimento (Figura 6).

O Refrigerante 4 possui dois circuitos de arrefecimento independentes que culminam na mesma torre de arrefecimento. Cada circuito possui dois grupos eletrobomba, um de reserva, e um conjunto de permutadores de calor (Figura 7).

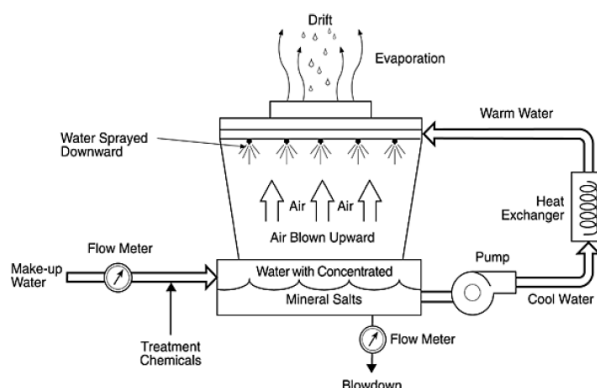


Figura 6 – Esquema de um circuito de arrefecimento industrial [2]

Permutadores de Calor

Um dos circuitos atua no processamento de soda e na instalação de concentração de soda, doravante denominado por circuito SODA. Este circuito possui quatro permutadores de calor: dois condensadores, do tipo *shell-and-tubes*, e dois permutadores de placas; projetados para um caudal conjunto de 450 m³/h.

O segundo circuito intervém na remoção de calor nos processos associados à eletrólise: hidrogénio, cloro, salmoura e soda cáustica. Doravante este circuito será denominado por circuito AGC. Este circuito é composto por seis permutadores de calor do tipo permutadores de placas e de *shell-and-tubes*, em igual número. Este circuito foi projetado para um caudal conjunto de 525 m³/h.

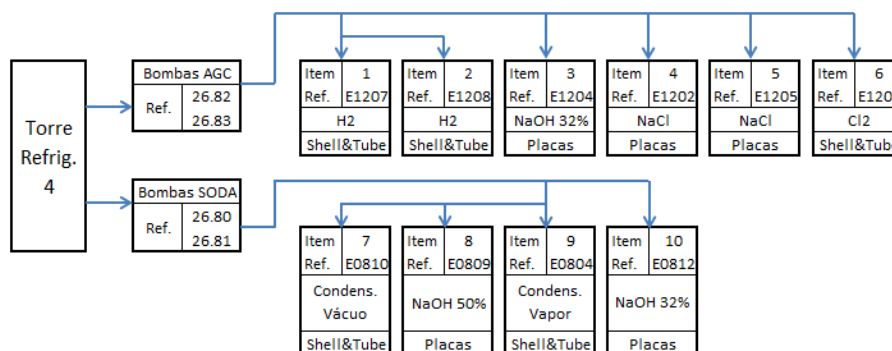


Figura 7 – Esquema dos circuitos do Refrigerante 4

Torre de Arrefecimento

Na torre de arrefecimento, a água dos dois circuitos converge para a mesma tubagem que a irá distribuir o mais uniformemente possível pelas quatro células de arrefecimento, as quais estão inseridas na mesma bacia de retenção de onde é aspirada a água arrefecida para cada um dos circuitos (Figura 8).

As células são do tipo convecção forçada, de corrente de ar induzida em contracorrente com o caudal de água, com material de enchimento (Figura 9). Cada célula tem um ventilador com dois metros de diâmetro acoplado a um motor elétrico com a potência de 18,5 kW.

A torre de arrefecimento foi dimensionada para um arrefecimento de 10°C, de 40°C para 30°C, para as condições extremas de ar atmosférico a uma temperatura de bolbo húmido de 23°C. A lógica de funcionamento da torre de arrefecimento tem por base a temperatura da água que se encontra na bacia, sendo que o número de ventiladores em funcionamento irá depender das exigências de arrefecimento. Os ventiladores não possuem qualquer variador eletrónico de velocidade.



Figura 8 – Refrigerante 4

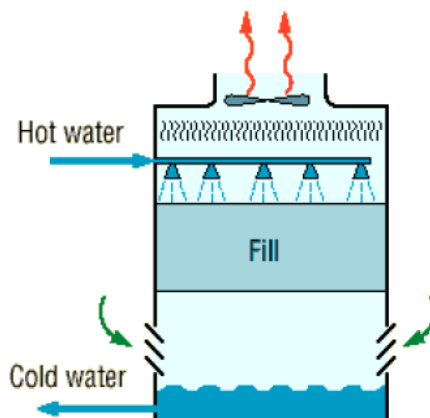


Figura 9 – Tipologia das torres de arrefecimento em estudo [2]

Sistemas de Bombagem

Os sistemas de bombagem são constituídos por bombas centrífugas e motores elétricos trifásicos, com as seguintes características:

Tabela 2 – Condições de projeto dos grupos eletrobomba

Caudal	500	m ³ /h
Altura Manométrica	46	mca
Diâmetro do Impulsor	388	mm
Eficiência da Bomba	74	%
Velocidade Rotação	1450 / 4	rpm / polos
Frequência	50	Hz
Tensão	380	V
Potência do Motor	110	kW
Eficiência do Motor (IE1) [3]	93,3	%

3. Diagnóstico da Instalação de Arrefecimento Industrial

3.1. Ponto de Partida

O Refrigerante 4 é o maior consumidor de energia elétrica e de água bruta dos cinco refrigerantes existentes na instalação fabril de PCA, motivo pelo qual foi escolhido para ser alvo de análise. Para além deste motivo, o facto de ter havido alterações nas condições de funcionamento de alguns dos permutadores de calor que constituem os circuitos (uns desativados e outros reduzidas as necessidades de remoção de calor), permite prever um potencial de otimização e redução de consumos que justifica este estudo. É ainda de salientar que o Refrigerante 4 é responsável por aproximadamente 1 % de todo o consumo de energia elétrica da fábrica de PCA.

3.2. Caracterização e Metodologia

Um dos objetivos deste estudo é avaliar as condições de funcionamento de cada permutador de calor dos dois circuitos de arrefecimento associados ao refrigerante 4, devido ao consumo elevado de água de *make up* e ao potencial de redução de consumo energético dos grupos eletrobomba devido ao desfasamento entre as necessidades atuais e as condições de projeto. Uma vez feito o diagnóstico do sistema, pretende-se apresentar um conjunto de propostas que reduz ao mínimo o caudal de água de arrefecimento dos permutadores de calor, continuando a garantir as exigências dos processos, e assim reduzir a carga dos grupos eletrobomba (Tabela 3).

Para realizar este estudo foi necessário fazer o levantamento de toda a informação existente relativa às especificações e às condições de projeto de cada um dos permutadores de calor. Em seguida fez-se a parametrização das temperaturas e caudais de operação com funcionamento das eletrólises a carga alta (maior nível produção) e a carga baixa (menor nível de produção). Foram analisados os resultados de modo a verificar o desempenho dos equipamentos e a existência de potenciais alterações dos seus parâmetros de funcionamento com vista à otimização do circuito e consequente redução do consumo de energia elétrica dos sistemas de bombagem.

Os resultados deste estudo concluem que no circuito AGC do refrigerante 4 existe uma redução em cerca de 30 % e 50 % do caudal necessário, respetivamente em carga alta e baixa, face ao definido em projeto. Contudo, ainda existe a possibilidade de o reduzir até aos 60 % e 70 %, respetivamente, para carga alta e baixa. Há, por isso, grande potencial de aplicabilidade de um variador eletrónico de velocidade no grupo eletrobomba, visto que uma redução de carga em 20 % pode significar uma redução de potência em 50 %. Relativamente aos permutadores de calor, pela análise dos seus parâmetros de desempenho concluiu-se que existem dois permutadores que não estão a atingir os *setpoint* desejados. Estima-se que esta perda de desempenho seja originada por questões de *fouling*, devido a elevados períodos de funcionamento abaixo das condições de projeto, que possibilita a acumulação de sólidos existentes em suspensão na água.

3.3. Resultados e Discussão

Tabela 3 – Resumo do diagnóstico da instalação de arrefecimento, propostas de intervenção e seus benefícios

Permutador	Diagnóstico	Proposta	Benefícios
Circuito AGC			
Cloro (E12.01)	<ul style="list-style-type: none"> - A falta de caudal indicia obstrução do permutador - O <i>setpoint</i> não está a ser atingido 	<ul style="list-style-type: none"> - Limpeza química no local - Retirar para inspecionar - Analisar consequências nos processos a jusante deste permutador 	<ul style="list-style-type: none"> - Assegurar conservação e segurança do permutador - Possível melhoria de eficiência nos processos a jusante
Hidrogénio (E12.07)	<ul style="list-style-type: none"> - Aparente obstrução do permutador por comparação com o E12.08 - Potência térmica insuficiente em caso de aumento de produção - Potência térmica excessiva em carga baixa 	<ul style="list-style-type: none"> - Efetuar a limpeza química em operação ou abrir para manutenção (a abertura não implica paragem de produção) - Implementação de válvulas de controlo para regular o caudal 	<ul style="list-style-type: none"> - Assegurar conservação, segurança e desempenho do permutador em caso de aumento de produção - Redução de 15 m³/h de água
Hidrogénio (E12.08)	<ul style="list-style-type: none"> - Potência térmica excessiva - Redundância do seu funcionamento 	<ul style="list-style-type: none"> - Implementação de válvulas de controlo para regular o caudal - Analisar a possibilidade de aumentar a temperatura de envio de hidrogénio de 35°C para 40°C. 	<ul style="list-style-type: none"> - Redução de 38 m³/h de água ou - Redução total de caudal de 96 m³/h
Salmoura (E12.02)	<ul style="list-style-type: none"> - Apenas funciona para aquecimento 		<ul style="list-style-type: none"> - Menos 130 m³/h de água face ao projeto do circuito
Salmoura (E12.05)	<ul style="list-style-type: none"> - Desativado 		<ul style="list-style-type: none"> - Menos 16 m³/h de água face ao projeto do circuito
Soda (E12.04)	<ul style="list-style-type: none"> - A funcionar corretamente - Aparenta bom desempenho 		
Circuito SODA			
Vapor (E08.04)	<ul style="list-style-type: none"> - Caudal de água excessivo 	<ul style="list-style-type: none"> - Implementação de válvulas para regulação de caudal 	<ul style="list-style-type: none"> - Redução do caudal de água no mínimo em 65 m³/h assegurando o melhor desempenho da instalação
Soda _{50%} (E08.09)	<ul style="list-style-type: none"> - Bom desempenho atual - Frequente paragem de funcionamento por colmatção 	<ul style="list-style-type: none"> - Projetar novo(s) permutador(es) 	<ul style="list-style-type: none"> - Assegurar bom funcionamento - Redução dos custos de limpeza
Soda _{32%} (E08.12)	<ul style="list-style-type: none"> - Potência térmica insuficiente - Aparenta obstrução no interior - Não foi dimensionado para esta função 	<ul style="list-style-type: none"> - Projeto de novo(s) permutador(es) - Projeto de alteração da lógica do processamento de soda 	<ul style="list-style-type: none"> - Redução de caudal equivalente a 70 m³/h de água com a intermitência da nova lógica de funcionamento - Melhoria da eficiência do processamento de soda e da instalação de concentração de soda
Injetores (-E08.04)	<ul style="list-style-type: none"> - Não existe informação 		

Da análise dos resultados deste diagnóstico surgiram as seguintes propostas de medidas de melhoria da eficiência energética, em estudo detalhado no capítulo 5:

- Otimização do circuito de bombagem de soda cáustica
- Otimização do arrefecimento de soda cáustica concentrada
- Implementação de variadores eletrónicos de velocidade
- Monitorização da torre de arrefecimento

4. Enquadramento Teórico e Instrumentação

4.1. Enquadramento das Medidas Propostas

4.1.1. Torres de Arrefecimento

Uma torre de arrefecimento é um equipamento usado para reduzir a temperatura de um caudal de água, removendo-lhe calor e libertando-o para a atmosfera. As torres de arrefecimento operam segundo o princípio da evaporação, onde uma parte da água que circula é evaporada para a corrente de ar que a atravessa e é assim libertada para a atmosfera. Como resultado deste processo evaporativo, o restante caudal de água é arrefecido. Quando comparado com dispositivos que apenas utilizam o ar como meio de rejeição de calor, caso dos radiadores dos automóveis, as torres de arrefecimento são mais rentáveis e energeticamente mais eficientes. [2].

As torres de arrefecimento operam segundo o princípio de remoção de calor por evaporação de uma porção da água que é recirculada através da torre, sendo o calor removido essencialmente o calor latente de vaporização. Existem várias expressões e aproximações para determinar as perdas por evaporação em torres de arrefecimento, no entanto todas elas rondam a mesma ordem de grandeza:

- 1 % do caudal recirculado é evaporado por cada 6 °C de arrefecimento [4]
- 1,8 m³ de água evaporada por cada 4.178 MJ de calor removido [2]

A quantidade de calor perdido pela água depende do aumento da temperatura do ar, antes deste sair da torre. Isto significa que tanto a temperatura de bolbo seco (TBS) como de bolbo húmido (TBH) do ar ambiente são importantes. Quando TBH=TBS, esta condição corresponde a 100 % de humidade relativa (HR), estando o ar totalmente saturado de humidade. Nestas condições o ar já não aceita mais água, e a falta de evaporação não permite rejeitar calor para o ar como desejado. [5]

Quanto maior for a diferença entre a TBS e a TBH, menor é a humidade relativa, e mais seco é o ar. Quanto menor a humidade relativa do ar maior a capacidade que este tem para receber e reter água, o que resulta numa redução mais acentuada da temperatura da água. [5]

A principal vantagem do arrefecimento por evaporação é a utilização da temperatura de bolbo húmido do ar ambiente, que é tipicamente 10 °C a 30 °C mais baixa que a temperatura de bolbo seco, dependendo do clima local. Quanto mais baixa for a temperatura e a humidade do ar ambiente mais eficiente é o processo de arrefecimento realizado pela torre de arrefecimento. [5]

4.1.2. Bombas Centrífugas e Variadores Eletrônicos de Velocidade [6]

As bombas centrífugas são usadas em diversas aplicações industriais e comerciais, e são geralmente dimensionadas para operarem perto do ponto de maior eficiência. No entanto, a frequência de períodos de funcionamento em que é requerido o máximo de caudal da bomba é mínima (Figura 10), e por isso é necessário utilizar métodos para o controlo de caudal. O método mais comum para o fazer é utilizando válvulas que aumentem a pressão do sistema, introduzindo resistências ao escoamento. Inerente a este método está associado um desperdício de energia usado no acionamento da bomba, passando esta a operar a níveis de eficiência mais baixos (Figura 11).

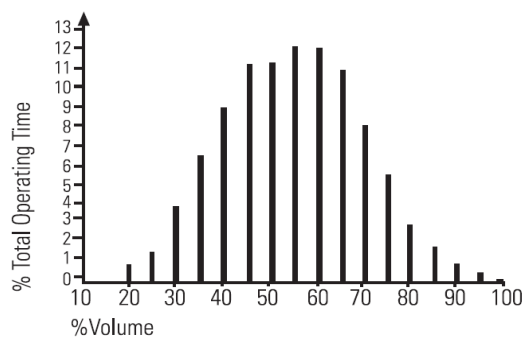


Figura 10 – Ciclo típico de funcionamento de uma bomba centrífuga [6]

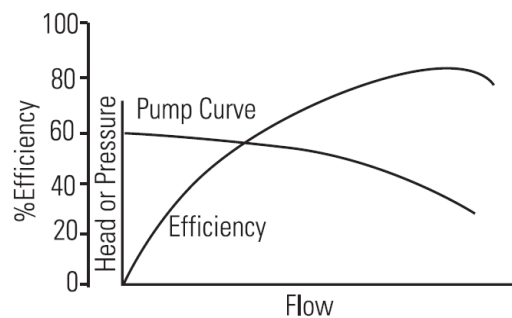


Figura 11 – Variação da eficiência das bombas centrífugas [6]

Observando as leis de afinidade das bombas centrífugas, constata-se que:

- o caudal é diretamente proporcional à velocidade de;
- a pressão é proporcional ao quadrado da velocidade;
- a potência é proporcional ao cubo da velocidade.

Desta forma, é teoricamente possível o funcionamento a 50 % do caudal com apenas 13 % da potência necessária para 100 % de caudal (Figura 12).

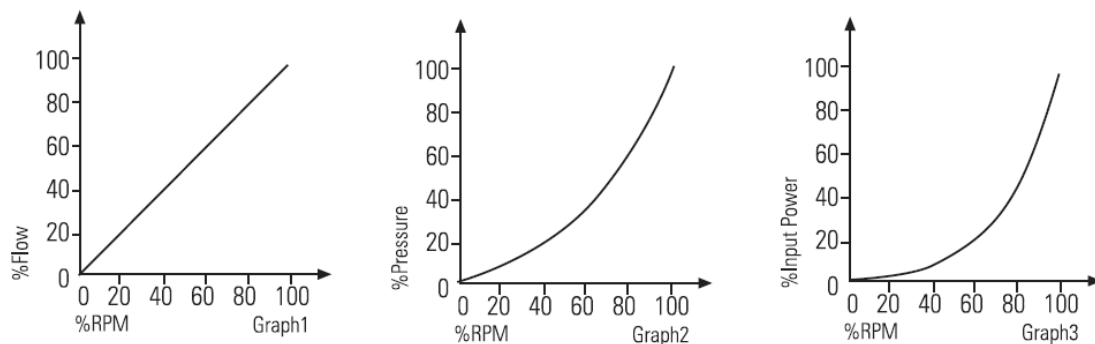


Figura 12 – Leis da afinidade das bombas centrífugas [6]

A interseção da curva característica da bomba e da instalação, sem válvulas de controlo de caudal, define o ponto natural de operação do circuito (Figura 13).

Recorrendo à utilização de válvulas para redução de caudal aumentam-se as perdas de carga do circuito. A alteração da curva do sistema origina um novo ponto de funcionamento (Figura 14). Desta forma, é atingida a redução de caudal desejada com o aumento da pressão relativa do sistema.

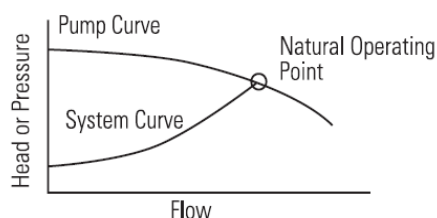


Figura 13 – Ponto de funcionamento do circuito [6]

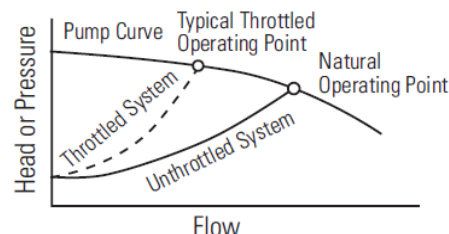


Figura 14 – Redução de caudal por estrangulamento [6]

A redução da velocidade de rotação da bomba faz com que a sua curva característica se desloque em direção à origem do referencial (Figura 15). Visto que o ponto de funcionamento do circuito é determinado pela interseção da curva da bomba, com velocidade reduzida, com a curva da instalação, é possível atingir a mesma redução de caudal que poderia ser conseguida através das válvulas, com uma pressão do sistema significativamente menor, sendo assim uma menor potência requerida pela bomba (Equação 1).

$$P [W] = \Delta P [Pa] \times \dot{V} [m^3/s] \quad (\text{Eq. 1})$$

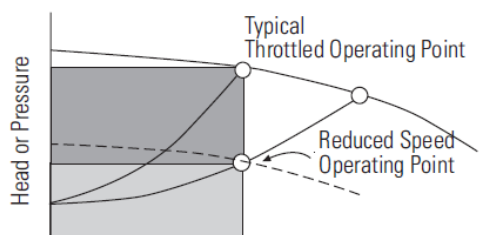


Figura 15 – Ponto de funcionamento por redução de velocidade da bomba [6]

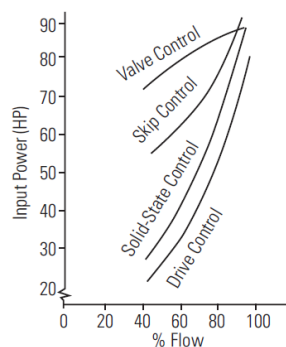


Figura 16 – Comparação de potências dos vários métodos de regulação de caudal [6]

Os dois retângulos sombreados da Figura 15 correspondem à potência requerida pela bomba nas duas situações. Alterando a velocidade de rotação da bomba apenas temos a potência necessária dada pelo retângulo com sombreamento mais claro. Desta forma, o potencial de poupança de energia disponível, para o caudal desejado, corresponde ao retângulo com sombreamento mais escuro. Pela análise da área dos retângulos, é notória a substancial redução na potência requerida, com a redução da velocidade de funcionamento da bomba. A Figura 16 ilustra esta questão ao comparar a potência requerida por cada um dos métodos de redução de caudal.

4.1.3. Permutadores de Calor e o Fenómeno de *Fouling*

Os permutadores de calor são projetados para condições extremas de operação, as quais são atingidas apenas em casos excepcionais. Por vezes, no seu projeto, já é contemplada uma perspectiva de aumento de capacidade de produção, aumentando a potência térmica do equipamento. No entanto, os permutadores de calor, principalmente os de placas, podem vir facilmente a perder rendimento e capacidade ao funcionarem a regimes abaixo dos quais foram projetados. Isto porque as velocidades dentro do permutador baixam substancialmente com a diminuição do caudal de operação o que potencia a deposição e incrustação de partículas nas placas do permutador de calor. Este problema é denominado por *fouling*, e consiste na deposição e incrustação das partículas que se encontram em suspensão na água no interior dos permutadores, devido a redução da tensão de corte, diretamente relacionada com a velocidade do escoamento no interior do permutador. Na Tabela 4 pode ver-se a influência que a redução de caudal tem na tensão de corte.

Tabela 4 – Estudo da influência da redução do caudal de operação na tensão de corte nos canais de um permutador de placas realizado por um fabricante de permutadores de calor.

	Caudal (m ³ /h)	Perda de Carga (kPa)	Tensão de Corte (Pa)
Projeto	335	63	36
Situação 1	100	7	4
Situação 2	200	24	14
Situação 3	300	51	30
Situação 4	400	87	50

Esta questão pode estar na causa de algumas perdas de rendimento detetadas, em primeira análise, em alguns permutadores de calor dos circuitos do refrigerante 4. As condições atuais de funcionamento de alguns permutadores estão relativamente abaixo daquelas para as quais foram projetados, o que potencia a ocorrência de *fouling*.

Este fenómeno foi detetado num dos permutadores de calor do circuito de soda, E08.09, que a arrefece à saída da instalação de concentração de soda, sobre o qual recaíram as primeiras suspeitas por não promover o arrefecimento necessário. Após abertura do permutador verificou-se que existe um gradiente de velocidade bastante acentuado no escoamento entre as placas. É perfeitamente visível onde a velocidade é mais baixa, porque nessas zonas existe uma acumulação de partículas sólidas bastante superior à que se verifica nas restantes zonas (Figura 17).



Figura 17 – Distribuição das zonas de acumulação de detritos nas placas do permutador

4.2. Instrumentação Utilizada

Para a análise das condições de funcionamento da instalação foi utilizada, sempre que possível, toda a instrumentação que se encontra inserida *in loco*: caudalímetros eletromagnéticos, termopares, manómetros, medidores de nível de reservatórios, contadores de energia, etc., dado serem os instrumentos nos quais o controlo automático de produção se baseia, havendo um histórico de medições.

No entanto, por não se justificar económica e processualmente, não existem instrumentos de medição em todas as linhas da instalação, por ser apenas esporadicamente necessário obter esses valores. Existem então três equipamentos de medição e monitorização portáteis a considerar:

- Caudalímetro ultrassónico
- Medidor de temperatura por infravermelhos
- Analisador de energia

4.2.1. Caudalímetro Ultrassónico

O caudalímetro ultrassónico permite a medição do caudal pelo exterior da conduta, para qualquer tipo de líquido e qualquer material de tubagem, desde que conhecidas as suas características. Possui dois sensores que devem ser posicionados e distanciados entre si consoante a tipologia da tubagem (Figura 18). Se a tubagem possuir revestimento é necessário polir para que a medição seja a melhor possível. Após a instalação dos sensores é necessário verificar a intensidade e qualidade do sinal efetuando pequenos ajustes dos sensores até atingir os parâmetros ideais. De seguida coloca-se o aparelho a efetuar a monitorização.



Figura 18 – Caudalímetro Katronic KATflow 230

Para perceção das diferenças entre os valores medidos por este aparelho e por instrumentos intrusivos, foram realizadas medições nas secções da instalação onde existem caudalímetros para comparação de valores. Os valores registados foram muito próximos, pelo que não foi realizada qualquer correção de medições.

4.2.2. Medidor de Temperatura por Infravermelhos

À semelhança da medição de caudal, também não existem sondas de temperatura em todas as linhas da instalação, pelo que foi necessário recorrer a um medidor de temperatura por infravermelhos (Figura 29).

O grau de precisão das medições efetuadas não era muito exigente, sendo necessárias apenas para efetuar balanços energéticos, pelo que se assumiu que a temperatura medida pelo exterior da tubagem, temperatura de superfície, seria igual à temperatura do fluido no seu interior.



Figura 19 – Termómetro de Infravermelhos Fluke 60

No entanto, seria possível a determinação do valor, mais aproximado, da temperatura do fluido, dado que a taxa de transferência de calor do fluido, T_s , para o meio ambiente, T_{amb} (Equação 2), iguala a taxa de transferência de calor da superfície exterior da tubagem, T_{se} , para o meio ambiente, T_{amb} (Equação 3). [7]

$$\frac{\dot{Q}}{L} = U_e \times \pi D_e \times (T_f - T_{amb}) \quad [\text{W/m}] \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\frac{\dot{Q}}{L} = h_e \times \pi D_e \times (T_{se} - T_{amb}) \quad [\text{W/m}] \quad (\text{Eq. 3})$$

Igualando as duas equações a única variável que não é possível conhecer é a temperatura do fluido. Assim, medindo a temperatura da superfície exterior com o medidor de temperatura por infravermelhos e, conhecidas as características da tubagem e do fluido que circula no seu interior para a determinação do coeficiente global de transferência de calor, a temperatura do fluido é dada pela Equação 4. [7]

$$T_f = \frac{h_e \times (T_{se} - T_{amb})}{U_e} + T_{amb} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{Eq. 4})$$

4.2.3. Analisador de Energia

Para a monitorização do consumo de energia e caracterização da potência requerida pelos motores a serem alvo de estudo recorreu-se a um analisador de energia (Figura 20). Com este aparelho foi possível monitorizar as potências ativa, reativa e aparente, o fator de potência, o consumo de energia associado ao período monitorizado, entre muitos outros parâmetros relacionados com a energia elétrica.



Figura 20 – Analisador de Energia Fluke 435

5. Estudo das Medidas de Eficiência Energética

5.1. Otimização do Circuito de Bombagem de Soda Cáustica

5.1.1. Resumo

Esta medida pretende estudar e melhorar eficiência energética do circuito de bombagem de soda cáustica concentrada a 32 %. Este é constituído por dois grupos eletrobomba com uma potência instalada de 11 kW cada, um permutador de calor de placas, E08.12, com uma potência térmica de 950 kW, e um reservatório com uma capacidade de 45.000 m³, T08.07.

Foram analisadas as condições de funcionamento do permutador de calor com o objetivo de determinar a origem da perda de rendimento evidenciada pela insuficiente remoção de calor. Posteriormente, foi feita uma análise a este circuito e estudadas eventuais alternativas que tornassem o processo mais eficiente. Por fim analisou-se o modo de funcionamento do grupo eletrobomba com o objetivo de obter reduções de consumo de energia elétrica por alteração da lógica do circuito e do seu modo de operação.

Com este estudo concluiu-se que o permutador de calor não serve para as necessidades atuais do circuito, possuindo área de permuta insuficiente. Foram definidas novas condições de operação e alterações ao circuito para melhorar a eficiência energética e potenciar a redução de consumo elétrico no grupo eletrobomba:

1. A alimentação ao circuito é feita diretamente ao reservatório;
2. A linha de recirculação ao reservatório é desativada;
3. A linha de envio para a instalação de concentração de soda passa a montante do permutador de calor e só é utilizada em casos excecionais;
4. O grupo eletrobomba apenas opera em períodos de envio de soda.

Com a implementação das soluções propostas a este circuito é possível reduzir o consumo de energia elétrica em 83 %, que equivale a aproximadamente 50 MWh, tendo como referência a produção no ano de 2013. Assumindo 100 €/MWh como custo da energia elétrica¹, teremos uma poupança anual de 5.000 €.

Apesar de a aquisição de um novo permutador de calor ser uma necessidade, independentemente de esta medida ser aplicada, o investimento será de 3.000 €, obtendo o retorno do investimento em aproximadamente 7 meses.

Para além de energia elétrica, obtém-se uma redução de 23,5 toneladas de CO₂ equivalentes anuais, e uma redução 82 % do caudal de água de recirculação.

¹ Valor assumido devido à impossibilidade de referir o custo real da energia elétrica.

5.1.2. Ponto de Partida

Com o decorrer da análise do circuito de arrefecimento foi detetado um potencial de melhoria das condições de operação, com consequente redução dos consumos elétricos, no circuito de processamento e bombagem de soda cáustica.

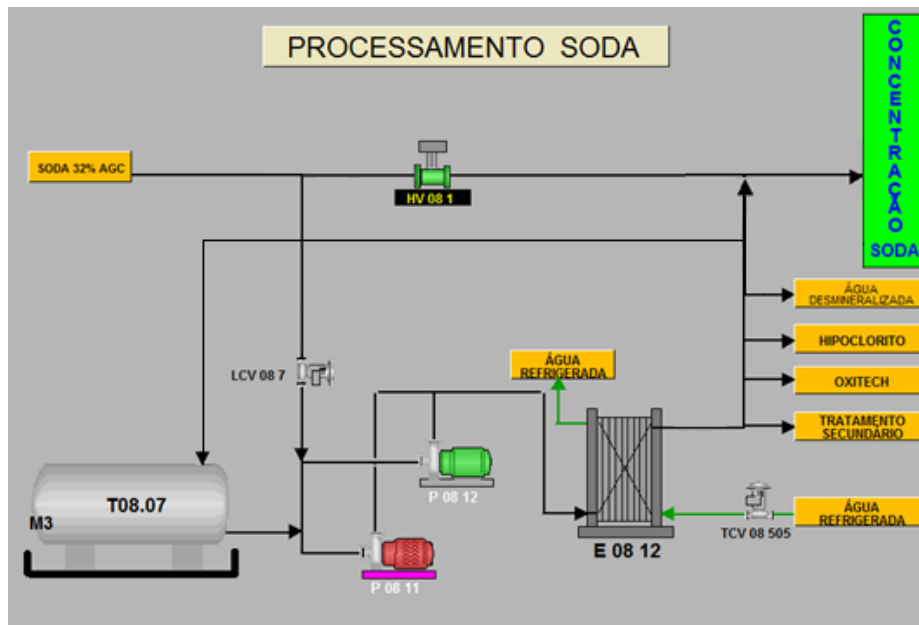


Figura 21 – Dashboard do circuito de processamento de soda

Este circuito destina-se a armazenar e arrefecer soda cáustica para posterior distribuição pelos vários consumidores a jusante e armazenagem final, através de um permutador de calor, designado por E08.12 (Figura 21). Da análise das condições e modo de funcionamento deste circuito evidenciam-se os seguintes aspetos:

- Intermitência de envio de soda para os consumidores, operando as bombas em recirculação nos restantes períodos;
- Perda de desempenho do permutador, que não está a remover o calor necessário;
- Potencial melhoria energética num processo a jusante no qual se aquece a soda previamente arrefecida.

As condições de funcionamento do processamento de soda, à semelhança de muitos outros processos da fábrica, estão diretamente relacionados com carga de funcionamento das eletrólises. Quando a carga está alta, a produção de soda e a sua temperatura é mais elevada, havendo uma maior necessidade de remoção de calor no permutador E08.12 do que em condições de operação de carga baixa. No entanto, o permutador tem de ter capacidade para satisfazer as necessidades em qualquer regime de funcionamento, desde a carga baixa até à carga alta. Desta forma, nas situações de carga baixa as condições de funcionamento estarão abaixo das condições de projeto, potenciando a ocorrência de *fouling*.

5.1.3. Caraterização e Metodologia

O primeiro objetivo foi perceber as condições de funcionamento do permutador de calor E08.12 e determinar a causa da insuficiente remoção de calor. Com a análise da documentação disponível verificou-se que este permutador foi projetado para um processo de soda concentrada a 50 %, e mais tarde adaptado para a atual função.

Procedeu-se à monitorização do caudal de água, através do caudalímetro ultrassónico e registaram-se as temperaturas de entrada e saída no permutador, tanto do lado da água como da soda cáustica. Com estes dados procedeu-se ao balanço energético ao permutador de calor e, por comparação com os valores de projeto, determinaram-se as causas que poderão estar na origem do problema. Para efetuar o balanço energético foram utilizadas as Equações 5, 6 e 7, onde T representa a temperatura da soda cáustica, e t a temperatura da água. [7]

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times (T_1 - T_2) \quad [\text{W}] \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{in} - t_{out}) - (T_{out} - t_{in})}{\ln \frac{T_{in} - t_{out}}{T_{out} - t_{in}}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{Eq. 6})$$

$$U = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_{lm} \times A} \quad [\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}] \quad (\text{Eq. 7})$$

De seguida analisou-se a lógica do circuito de processamento de soda e equacionaram-se várias possibilidades de alteração do sistema, de modo a melhorar as condições de operação e de tornar o circuito mais eficiente. Destas, apenas foi estudada aquela que aparentava ter menores implicações e menores custos de alteração é a proposta alvo de estudo de viabilidade de implementação. Com as alterações a efetuar ao circuito pretende-se também definir as novas condições de operação do permutador e a carga a impor ao grupo eletrobomba.

Relativamente ao grupo eletrobomba fez-se a monitorização do consumo elétrico com recurso ao analisador de energia em simultâneo com o controlo de caudal de soda a ser bombeada, para ser possível determinar a energia consumida no envio de soda. A posterior análise destes dados pretende determinar:

1. a energia consumida no envio de soda para armazenagem final;
2. a energia consumida na recirculação da soda do tanque e envio para a instalação de concentração de soda

Para a obtenção destes dados foi necessário realizar um teste² onde foram interrompidas as linhas de recirculação ao tanque e de envio para a instalação de concentração de soda. Desta forma foi possível determinar a potência elétrica necessária para efetuar envios para armazenagem final. Por comparação com os valores em normal funcionamento, foi possível determinar o consumo associado em cada regime e o potencial de poupança.

² 19 de Maio de 2014 das 15h30 às 22h00

5.1.4. Resultados e Discussão

Análise de desempenho do permutador de calor

Com os dados de projeto conhecidos para a soda concentrada a 50 %, foi possível extrapolar para obter uma estimativa dos dados de projeto para soda concentrada a 32 %. Desta forma, para os mesmos caudais de funcionamento, os *setpoint* atingidos serão diferentes devido às diferentes densidades e calores específicos dos diferentes níveis de concentração da soda cáustica (Tabela 5).

Com a monitorização do desempenho do permutador de calor nas atuais condições de funcionamento observa-se uma diminuição de 45 % da potência térmica removida à soda. Quanto à água, esta apenas aumenta a sua temperatura em 5 °C quando deveria aumentar em 10 °C. Isto significa que as trocas de calor não estão a ocorrer porque o tempo de residência no interior do permutador não é suficiente para que tal aconteça. Como o coeficiente global de transferência de calor se mantém praticamente constante, se a diferença média logarítmica de temperaturas diminui, a área de permuta terá forçosamente de aumentar para que a potência térmica se mantenha.

Desta forma foi requerido o dimensionamento de um permutador de calor para remover calor a um caudal de 26 m³/h de soda cáustica concentrada a 32 % de uma temperatura de 85 °C para 35 °C, o que perfaz uma potência térmica de 1.700 kW.

Tabela 5 – Condições de funcionamento de projeto vs atuais do permutador de calor E08.12

	Projeto	Projeção/Adaptação	Atual	
	NaOH 50%	NaOH 32%	NaOH 32%	
\dot{V}_{NaOH}	25	25	26	m ³ /h
T_{in} / T_{out}	90/60	83/53	59/43	°C
\dot{V}_{H_2O}	94	85	85	m ³ /h
t_{in} / t_{out}	30/40	30/40	25/30	°C
\dot{Q}	1.037,5	980,4	550,6	kW
ΔT_{lm}	39	39	23	°C
U	3.764	3.557	3.400	W/m ² . °C

Análise da proposta de alteração do circuito

A proposta de alteração do circuito de processamento de soda passa por:

1. Alimentar o tanque diretamente da linha de soda das eletrólises.
2. Eliminar a linha de recirculação ao tanque.
3. Alterar a linha de envio do tanque para a instalação de concentração de soda para antes do permutador.
4. Programar o sistema de controlo para ser possível, de forma automática, ativar o grupo eletrobomba a partir da sala de controlo.

Na Figura 22 está identificada a amarelo a linha de recirculação ao tanque que será eliminada e assinaladas com um círculo vermelho as linhas de alimentação do circuito e de envio para a concentração de soda, que irão ser reposicionadas. Na Figura 23 está representada a configuração do circuito após as alterações. A azul estão assinaladas as linhas do circuito que anteriormente estavam assinaladas a vermelho.

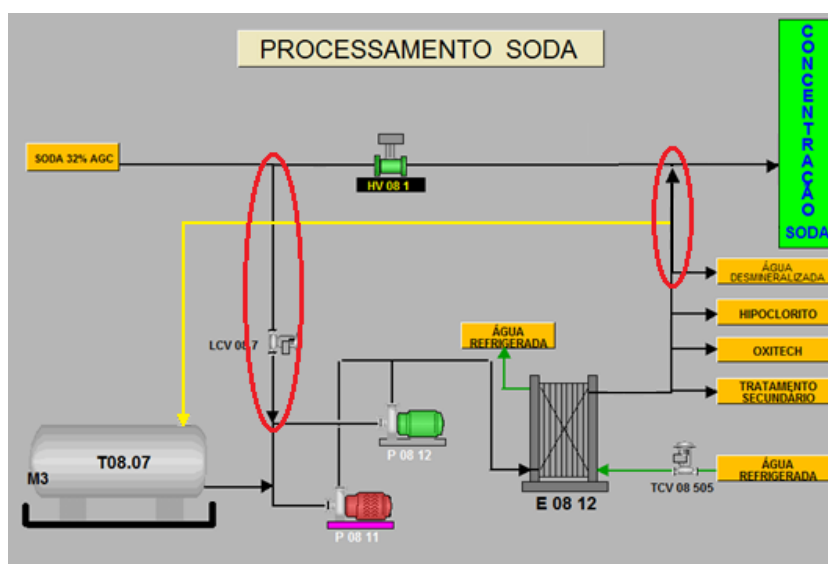


Figura 22 – Identificação das linhas a alterar e a eliminar

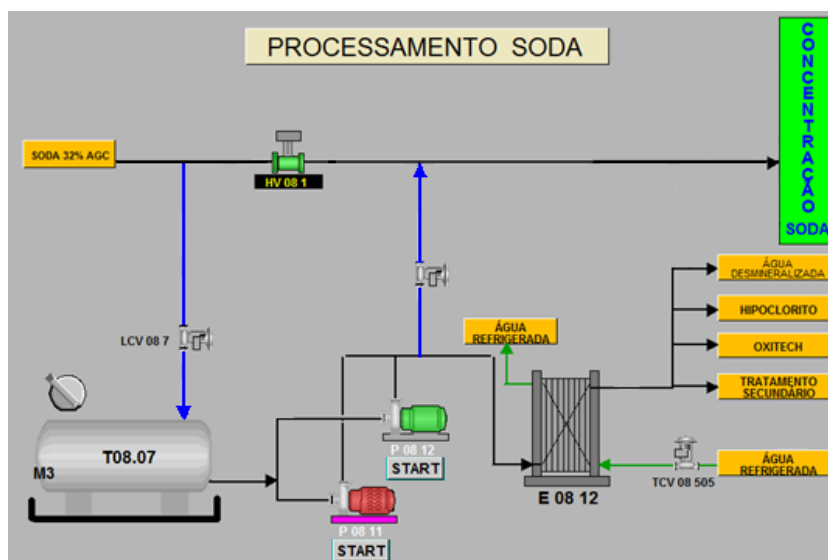


Figura 23 – Proposta de alteração do circuito de processamento de soda

Agregada a esta alteração do circuito vem uma nova metodologia de operação. O grupo eletrobomba só entra em funcionamento quando é necessário fazer envios para armazenagem final. A linha de *bypass* ao permutador, que vai para a instalação de concentração de soda, existe para:

- Uma eventual necessidade de reforço da alimentação de soda, passando a estar disponível soda quente no tanque;
- Uma necessidade de estabilizar a instalação no arranque da fábrica;
- Manter a instalação a operar caso haja paragem de produção nas eletrólises.

Desta forma, esta linha continuará a existir mas estará fechada durante o normal funcionamento do circuito.

Esta configuração torna o circuito mais eficiente na medida em que:

1. O grupo eletrobomba não necessita de funcionar 24h/24h;
2. Não se arrefece soda para posteriormente a aquecer;
3. Não se consome energia elétrica apenas para recircular a soda do tanque;
4. Reduz-se a carga térmica no circuito de arrefecimento que abastece o permutador.
5. O regime de funcionamento do permutador passa a ser constante.

Como o sistema de bombagem, o tanque, o permutador e o painel de válvulas se encontram no mesmo local, a necessidade de tubagem e de acessórios é reduzida, não devendo ser significativo o custo que estas alterações irão acarretar.

Análise do consumo de energia do grupo eletrobomba

O atual regime de funcionamento não permite conhecer qual o caudal total a ser bombeado. No entanto, através de um caudalímetro que se encontra a jusante do permutador, é possível determinar uma parte desse caudal, que corresponde ao caudal de envio para a armazenagem final. Neste caso, o caudal de envio de soda é em média de 26 m³/h.

Conhecido o caudal de envio resta conhecer a potência de bombagem a ele associada. Neste sentido, durante o período de teste, foram fechadas as linhas de recirculação ao tanque e de envio de soda para a instalação de concentração de soda. O teste teve início com um envio de soda para a armazenagem final a decorrer, onde é perceptível a redução da potência ativa do grupo eletrobomba (Figura 24). Volta a observar-se uma quebra significativa na potência ativa do motor no final do envio, perto das 16h30, em que a potência atinge o mínimo registado, correspondente ao funcionamento em vazio.

Foram realizados mais dois envios de soda nas condições referidas, e um pouco antes das 22h, momento em que se deu início o último envio de soda do dia, voltou a haver recirculação ao tanque e envio de soda para a instalação de concentração de soda.

Desta forma foi possível caracterizar quatro regimes de funcionamento e as potências associadas a cada um, enumerados do de maior para o de menor potência requerida:

1. 8,1 kW – Recirculação de soda ao tanque + envio de soda para a instalação de concentração de soda + envio de soda para armazenagem final
2. 6,4 kW – Recirculação de soda ao tanque + envio de soda para a instalação de concentração de soda
3. 6,1 kW – Envio de soda para armazenagem final
4. 3,5 kW – Vazio

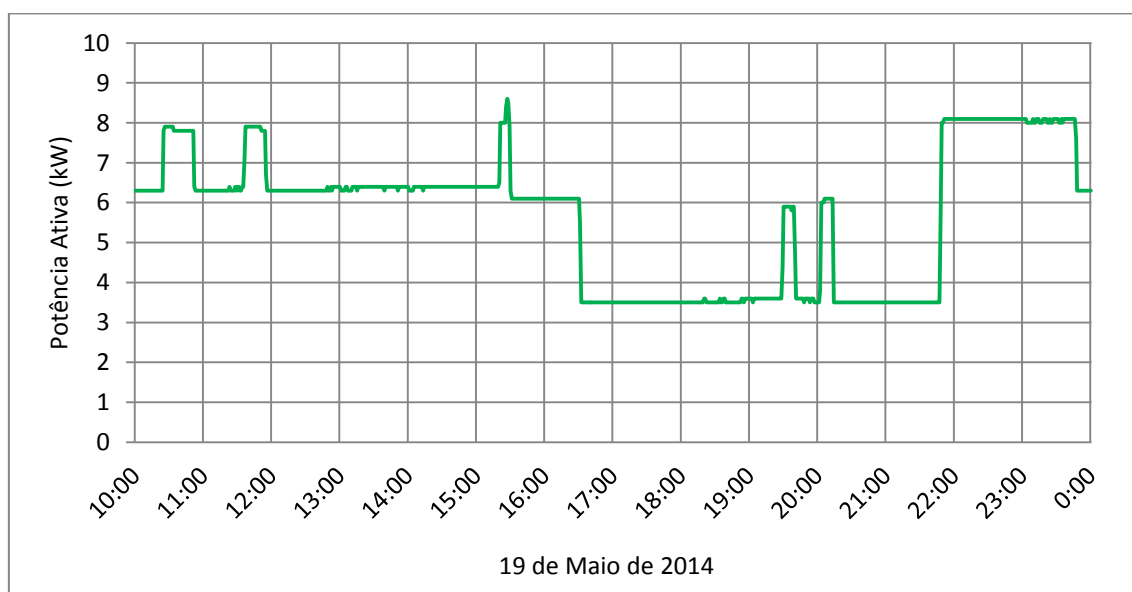


Figura 24 – Resultados do teste de alteração do circuito de processamento de soda na potência ativa do grupo eletrobomba P08.11

Analisando o gráfico são evidentes as diferenças nas potências de funcionamento das 10h às 12h, nos regimes 1 e 2, e no período das 19h e as 21h, nos regimes 3 e 4.

Com a nova filosofia pretende-se em primeiro lugar excluir a recirculação de soda ao tanque e envio de soda para a instalação de concentração de soda, que é responsável pelo decréscimo da potência ativa evidenciada no período das 15h30 às 22h. Adicionalmente, a paragem das bombas em períodos de funcionamento em vazio, por exemplo das 17h às 19h, permite uma poupança de 3,5 kW associada a este regime.

Com a análise do volume total de soda enviada a partir do tanque no ano de 2013 e assumindo um caudal médio de 26 m³/h, totalizaram-se 1.627 horas de funcionamento do grupo eletrobomba em regime de envio de soda para armazenagem final. São então conhecidas todas as variáveis para se determinar o consumo em cada regime retratado na Figura 24, que se encontra na Tabela 6.

Tabela 6 – Análise do consumo energético no ano 2013 e perspetivas de redução

Regime	Potência Ativa (kW)	Horas de funcionamento anuais (h)	
		Ano 2013	Futuro
1	8,1	1.627	0
2	6,4	7.133	0
3	6,1	0	1.627
4	3,5	0	0
	0	0	7.133
Funcionamento (h)		8.760	1.627
Total (kWh)		58.830	9.925
Redução (%)		-	83

Tendo como referência a produção do ano de 2013 nas atuais condições de funcionamento, espera-se obter, com a implementação destas alterações, uma redução do consumo de energia elétrica de 83 %, aproximadamente 50 MWh anuais, sem comprometer o funcionamento da instalação. Assumindo 100 €/MWh como preço da energia elétrica, teremos uma poupança anual de 5.000 €.

Apesar de a aquisição de um novo permutador de calor ser uma necessidade, independentemente de esta medida ser aplicada, o investimento será de 3.000 €, obtendo o retorno do investimento em aproximadamente 7 meses. O VAL a 10 anos é de 40.000 €.

Para além de energia elétrica, obtém-se uma redução anual de 23,5 toneladas de CO₂ equivalentes, e uma redução 82 % do caudal de água de recirculação neste permutador.

5.2. Otimização do Arrefecimento de Soda Cáustica Concentrada

5.2.1. Resumo

Esta medida pretende estudar e melhorar eficiência energética do circuito de arrefecimento de soda cáustica concentrada a 50 %. Esta medida advém do problema da rápida colmatação e consequente perda de rendimento do permutador de calor E08.09, e dos custos de manutenção que isso acarreta. O objetivo, em primeira análise, é perceber as razões que dão origem ao problema e em seguida estudar medidas que o solucionem.

A colmatação do permutador de calor deve-se ao desfasamento entre as condições de projeto e as atuais necessidades da instalação, estando o permutador de calor a funcionar, na grande maioria do tempo, abaixo dos 60 % da sua capacidade, o que leva a uma rápida colmatação do seu interior. Desta forma, o tempo de permanência em bom funcionamento não vai além dos 4 meses, acarretando um custo anual de 9.000 € apenas para limpeza do permutador de calor.

Como solução propõem-se duas hipóteses, ambas com a introdução de um permutador de calor adicional e com o redimensionamento do atual com vista à redução dos custos de manutenção e da necessidade de paragem da instalação.

A primeira hipótese insere-se na atual lógica de operação da instalação, e pretende-se fazer um jogo de combinações de funcionamento entre os dois permutadores de calor, em simultâneo ou individualmente, dependendo do caudal de soda produzida. Com isto pretende-se que os permutadores de calor funcionem o mais próximo do ponto ótimo, de modo a evitar o risco de colmatação. Sempre que necessário, o permutador de calor sacrificado, ou seja, aquele que funcionará mais distante do ponto ótimo, será o mais pequeno, por ter um custo de manutenção mais baixo e para a instalação poder continuar a funcionar com regimes mais altos durante a intervenção para limpeza.

A segunda hipótese admite dois permutadores de calor com capacidades mais distantes, um para carga alta e outro para carga baixa, sendo necessário reformular a lógica de operação da instalação para apenas dois regimes de funcionamento. Desta forma obtém-se o maior partido dos permutadores de calor e reduz-se, na totalidade, os custos de manutenção com limpeza dos permutadores de calor.

A implementação de qualquer uma das hipóteses pressupõe um investimento de aproximadamente 6.500 €, 2.000 € para o novo permutador de calor e 4.500€ para instrumentação. Com a implementação da segunda hipótese a este circuito é possível reduzir os custos de manutenção na totalidade, que são de 9.000 € anuais. Obtém-se assim o retorno do investimento em 6 meses.

Para além dos custos de manutenção, com a otimização do arrefecimento deste processo reduz-se a necessidade de caudal de água, o que reduzirá o consumo de energia elétrica nos sistemas de bombagem do refrigerante 4.

5.2.2. Ponto de Partida

Com o decorrer da análise do circuito de arrefecimento foi detetado um potencial de melhoria das condições de funcionamento e melhoria da eficiência energética de um permutador de calor, E08.09, responsável pelo arrefecimento de soda cáustica concentrada a 50 %.

O permutador de calor E08.09, responsável pelo arrefecimento da soda cáustica concentrada a 50% que é produzida na instalação de concentração de soda, é alvo de substituição de 4 em 4 meses por perda de rendimento devido a incrustações e colmatção (Figura 25, 26 e 27).

Estas substituições implicam a paragem de produção de soda cáustica a 50 % por um período mínimo de 4h. Quando o permutador de calor é retirado de serviço é enviado para o fabricante, para limpeza das placas, testes hidráulicos e montagem de um novo conjunto de juntas. Este serviço, à semelhança do último registado, custa perto de 3.000 €. Anualmente este permutador tem um custo de manutenção mínimo de 9.000 €, fora os custos de mão-de-obra e custos relacionados com a paragem de produção da instalação.

Para além destes custos, o facto de perder rendimento ao longo do tempo aumenta o consumo energético dos sistemas de bombagem, consequência do aumento do caudal de recirculação do refrigerante 4.



Figura 25, 26 e 27 – Distribuição das zonas de acumulação de detritos nas placas do permutador E08.09

5.2.3. Caracterização e Metodologia

Este permutador de calor, E08.09, está inserido na instalação de concentração de soda cáustica e é responsável pelo arrefecimento de toda a produção da instalação. Este permutador de calor foi dimensionado para arrefecer um caudal de 16,5 m³/h de soda cáustica concentrada a 50 % de 73 °C para 40 °C. Atualmente, o caudal de produção não vai muito além dos 12 m³/h, havendo uma maior ocorrência em redor dos 10 m³/h (Figura 28).

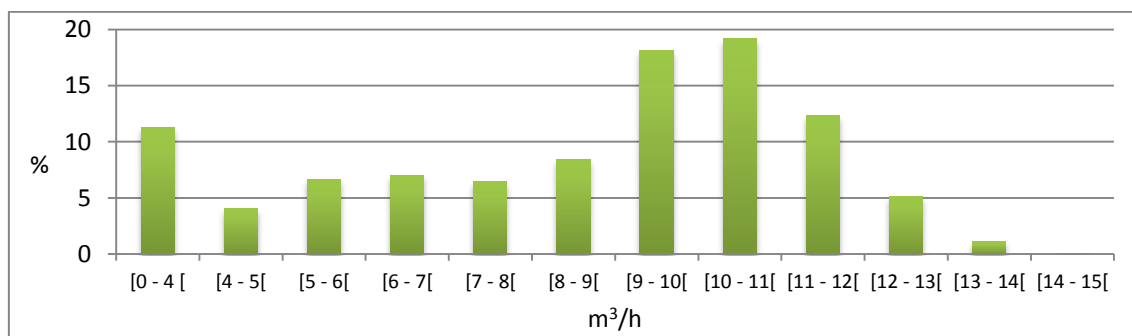


Figura 28 – Histograma do caudal de soda cáustica concentrada a 50 % produzida em 2013

Isto significa que o permutador está a funcionar abaixo do ponto de funcionamento ideal; para 10 m³/h está a funcionar a 60 % da carga máxima. Como podemos observar no estudo realizado por um fabricante deste tipo de permutadores de calor, a operação em cargas reduzidas faz com que a tensão de corte reduza substancialmente (Tabela 4).

Com isto, o efeito de autolimpeza que o fluido teria deixa de surtir efeito, permitindo a deposição e acumulação de detritos no interior do permutador de calor. Como o caudal de água é controlado consoante a necessidade de remoção de calor, se temos caudais baixos do lado do processo também iremos ter caudais de água reduzidos. Desta forma, e pelas mesmas razões, teremos o mesmo problema do lado da água.

As últimas substituições do permutador de calor ocorreram a 12 de Março e a 30 de Julho de 2014. Através dos respetivos gráficos é possível ver a diferença de rendimentos antes e após a substituição. O principal fator que evidencia a perda de rendimento é a abertura da válvula de controlo de água (roxo). Para os padrões mais comuns de funcionamento da instalação, quando a abertura de válvula regista valores sempre acima de 70 % é sinal de que já está com uma perda de rendimento considerável. Quando atinge 100 % é indício de que o permutador de calor já está a ficar bastante colmatado.

O objetivo é manter a temperatura de saída (vermelho) o mais próximo do *setpoint* (verde) com a menor abertura de válvula de controlo de água (roxo). Estas condições foram restabelecidas após a substituição do permutador a 12 de Março e a 29 de Junho (Figura 29 e Figura 30).

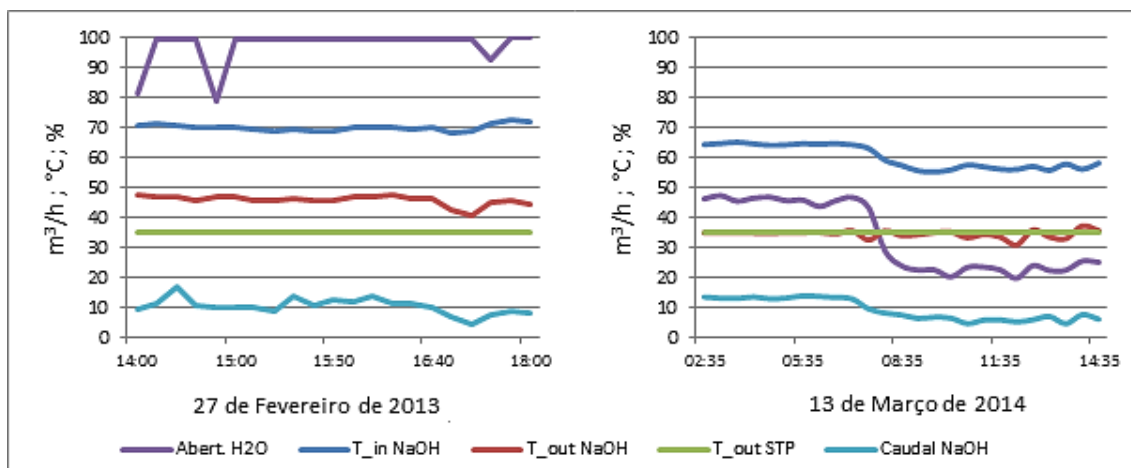


Figura 29 – Desempenho do permutador de calor E08.09 antes e depois da substituição de 12 de Março

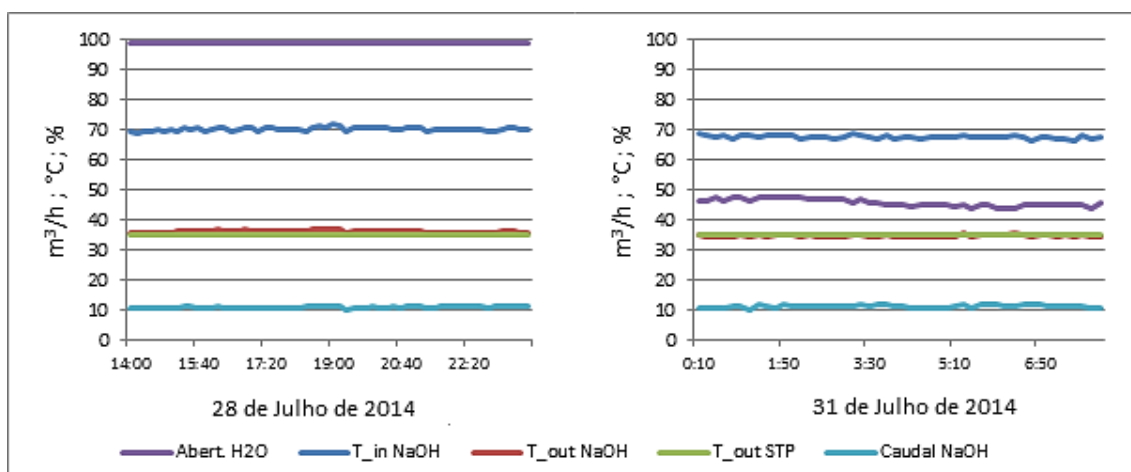


Figura 30 – Desempenho do permutador de calor E08.09 antes e depois da substituição de 29 de Julho

5.2.4. Resultados e Discussão

A proposta de solução passa por implementar dois permutadores de calor em paralelo com características diferentes, para melhor se adaptarem às condições de funcionamento de carga alta e baixa. Desta forma, consoante o caudal de produção de soda da instalação, este será arrefecido pelo permutador de calor que funcionará mais perto da carga máxima para a qual foi dimensionado. Como é espectável, numa expansão da capacidade da instalação, os dois permutadores de calor funcionarão em simultâneo para absorver o aumento de produção de soda cáustica.

Como existem dois permutadores de calor disponíveis, um de reserva ao outro, um deles será redimensionado para ser o permutador de calor de maior capacidade na nova configuração, sendo apenas necessário retirar algumas placas. O outro permutador de calor continuará como reserva. Desta forma será necessário adquirir um novo permutador de calor, o mais pequeno. Foi pedido o dimensionamento deste permutador de calor e também do de maiores dimensões para conhecer o número de placas que seria preciso retirar. O novo permutador de calor custará cerca de 2.000 €.

Para além da aquisição do permutador de calor mais pequeno é necessário adquirir duas válvulas de controlo automático com posicionadores, uma para controlo de nível (LCV) e outra para controlo de temperatura (TCV) e uma sonda de medição de temperatura (TT). Será reaproveitada a TCV08.3 e a LCV08.1 perfazendo as quatro válvulas necessárias (Figura 31). O investimento em instrumentação será de 4.400 €. O VAL a 10 anos é de 78.000 €.

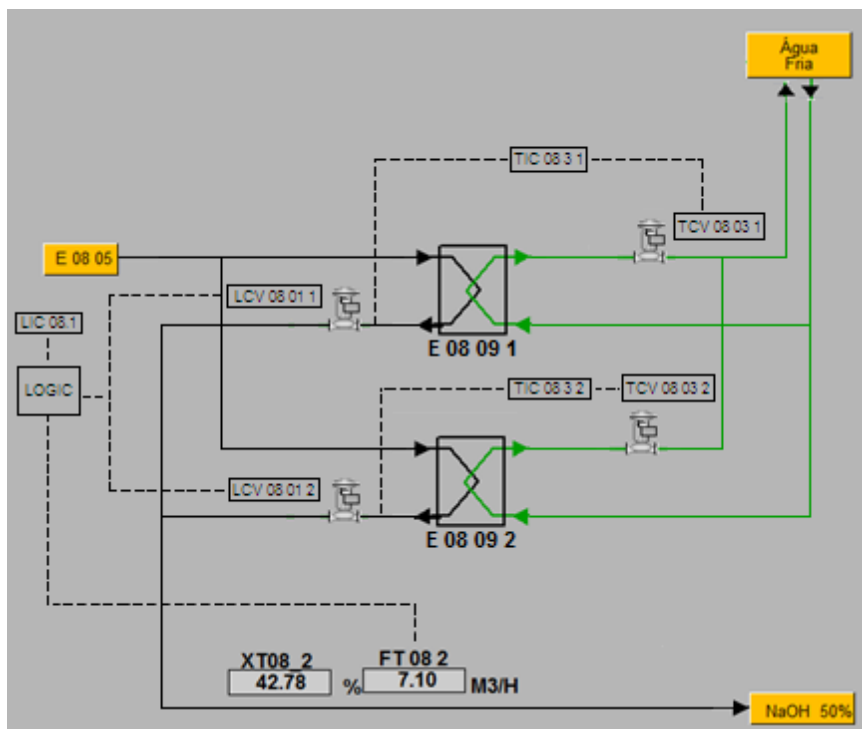


Figura 31 – Configuração do circuito com dois permutadores de calor em paralelo

Existem duas possibilidades para o dimensionamento dos permutadores de calor mediante a filosofia de operação dos circuitos de soda. Se a filosofia atual se mantiver, havendo uma variação de caudal entre os 4 m³/h e os 14 m³/h, o dimensionamento dos permutadores de calor será com base na frequência de ocorrência de cada um dos caudais, hipótese 1. Se for possível alterar a filosofia de regulação de caudal do circuito de processamento de soda e da instalação de concentração de soda, de modo a serem definidos dois regimes preferenciais, um para carga alta e outro para carga baixa, o dimensionamento dos permutadores de calor será diferente, hipótese 2.

Hipótese 1

O dimensionamento deverá ser feito de modo a que a combinação dos dois permutadores de calor cubra a maioria dos regimes de funcionamento, evitando desvios superiores a 20 % das condições de projeto, excluindo registos abaixo dos 5 % de incidência.

Com base no histograma (Figura 32), e com a análise da Tabela 7, considerando que o perfil de funcionamento da instalação se mantém, a combinação mais vantajosa, do ponto de vista da longevidade em serviço de cada um dos permutadores de calor, será de um permutador de calor dimensionada para 6,5 m³/h, permutador 1, e outro para 10 m³/h, permutador 2.

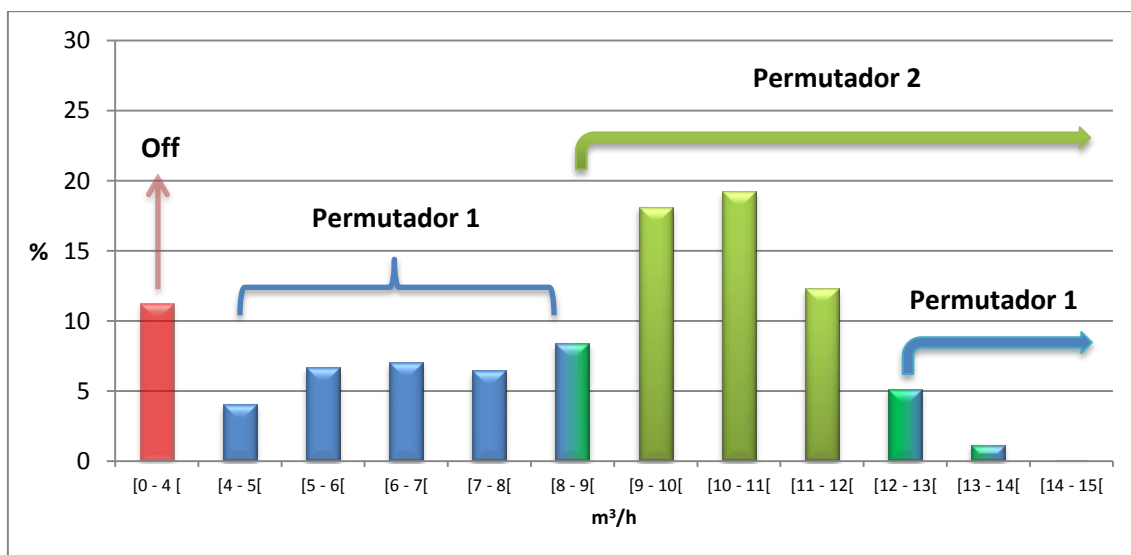


Figura 32 – Funcionamento dos permutadores de calor em função do caudal de soda cáustica

Tabela 7 – Carga de funcionamento de cada um dos permutadores de calor para as diversas combinações de caudais de funcionamento da instalação

Caudal de soda m³/h	Permutador 1	Permutador 2
4	60 %	-
5	77 %	-
6	92 %	-
7	107 %	-
8	123 %	(ou) 80 %
9	-	90 %
10	-	100%
11	-	110 %
12	-	120 %
13	50 %	100 %
14	55 %	100 %

Com esta combinação de permutadores de calor pretende-se manter o permutador 2 o mais próximo da carga máxima, maximizando o seu tempo de serviço entre limpezas. Para isso, o permutador 1 será, caso haja necessidade, colocado em funcionamento com caudais reduzidos, 4 e 5 m³/h e em caudais altos, 13 e 14 m³/h.

A razão por ser o permutador de calor mais pequeno a ser sacrificado deve-se ao seu custo de limpeza ser menor, visto ter menos placas, e também pelo facto de quando for necessário ser posto fora de serviço o permutador 2 garantir a maioria dos regimes de funcionamento da AGC, não sendo afetada a produção.

Para os valores acima de 100 %, para evitar a compensação por outro permutador de calor fora do regime ideal, recomenda-se que haja a possibilidade de fazer variar o *setpoint* entre 35 °C e 40 °C de modo a que os permutadores de calor continuem a operar na sua carga máxima. A temperatura de 40 °C é aceitável por parte dos materiais e segurança, por períodos não muito longos.

Hipótese 2

O dimensionamento dos permutadores de calor será com base em dois regimes preferenciais, capaz de suprir as necessidades tanto em carga alta como em carga baixa. Desta forma, através da análise do histórico de caudais de produção de soda em função da carga da eletrólise, 6 m³/h e 12 m³/h serão os caudais de soda que melhor corresponderão às necessidades das instalações (Figura 33).

Mantendo a instalação a operar nestes dois regimes, os permutadores de calor funcionarão sempre no ponto ótimo para o melhor rendimento e longevidade de serviço entre limpezas. Desta forma foram excluídos do estudo quaisquer custos com a limpeza destes permutadores de calor.

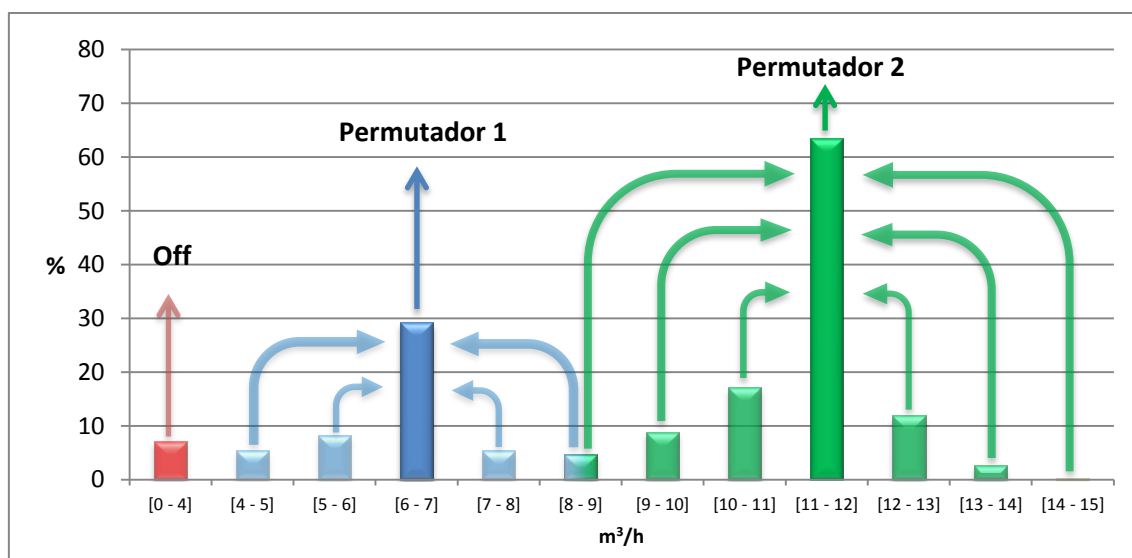


Figura 33 – Funcionamento dos permutadores de calor com base em dois regimes de produção

5.3. Implementação de Variador Eletrónico de Velocidade

5.3.1. Resumo

Esta medida pretende aproveitar o potencial de redução dos consumos energéticos nos sistemas de bombagem do refrigerante 4, circuitos AGC e SODA, através da implementação de variadores eletrónicos de velocidade.

Após analisados os dois circuitos associados a esta torre de arrefecimento, percebeu-se que existe uma redução de 30 % e 50 % das necessidades de caudal de água em carga alta e baixa, respetivamente, face ao projeto do circuito AGC. Com a implementação de um conjunto de medidas será possível reduzir as necessidades energéticas dos sistemas de bombagem até aos 60 % e 70 %, respetivamente. No circuito SODA, as necessidades atuais encontram-se muito próximas das condições de projeto, menos 3 % apenas, não havendo margem significativa para redução de consumos através de variador eletrónico de velocidade.

Após simulação em *software* da ABB, a implementação de variador eletrónico de velocidade no sistema de bombagem do circuito AGC irá atingir reduções de consumo de energia elétrica de 40 %, que equivale a 220 MWh anuais, para as condições de produção atuais. Aplicando as medidas para a redução do caudal de água do circuito, será possível atingir uma redução do consumo de energia elétrica de 70 %, que equivale a 330 MWh anuais.

O período de retorno do investimento de ambas as propostas é inferior a 6 meses, considerando um custo de energia elétrica de 100 €/MWh e 11.000 € para a aquisição do variador eletrónico de velocidade, valor definido no catálogo da ABB, Anexo I.

Inerente a estes resultados estará também uma redução de água de *make up* na torre de arrefecimento, dado estar diretamente relacionada com a diminuição do caudal de circulação, e ainda uma redução de 115 a 163 toneladas de CO₂ equivalentes, respetivamente.

5.3.2. Ponto de Partida

Após a análise que permitiu fazer o diagnóstico da instalação de arrefecimento, concluiu-se que existe uma redução das necessidades de abastecimento dos permutadores de calor face ao definido no projeto da instalação. Esta redução, num dos circuitos da instalação de arrefecimento, atinge os 30 % e 50 %, respetivamente em carga alta e em carga baixa. Com a análise pormenorizada de cada um dos permutadores de calor, constatou-se que será possível reduzir as necessidades de caudal de água até aos 60 % e 70 %, respetivamente. Estando perante bombas centrífugas, e segundo as leis da afinidade pelas quais se regem, a redução de caudal é diretamente proporcional à redução da velocidade. Relativamente à potência, esta reduz-se proporcionalmente à redução do cubo da velocidade (Figura 12).

Estando perante uma redução das necessidades do circuito para quase metade daquelas para que foi dimensionado, a viabilidade da implementação de um variador eletrónico de velocidade neste sistema de bombagem aparenta ser bastante promissora.

Associada a implementação desta medida de eficiência energética, e por forma a aumentar a sua rentabilidade e impacte energético, serão aplicadas também as medidas que permitirão alcançar uma maior redução das necessidades de caudal do circuito. Com isto, para além da redução de energia elétrica consumida no grupo eletrobomba, será também reduzido o caudal bombeado no circuito do refrigerante 4.

5.3.3. Caraterização e Metodologia

A recolha de dados para este estudo passou, em primeiro lugar, por uma análise das características dos dois grupos eletrobomba e das condições para as quais foram projetados. Estamos perante dois equipamentos com as mesmas características, que, embora funcionem em circuitos com características independentes, foram dimensionados para as mesmas condições de operação.

Para determinar as condições atuais de operação foi necessário efetuar a monitorização do consumo de energia elétrica do grupo eletrobomba em simultâneo com a monitorização do caudal de água em circulação. Para tal foi utilizado o analisador de energia e o caudalímetro ultrassónico.

Como as necessidades de arrefecimento variam consoante a produção, durante a monitorização dos circuitos do refrigerante 4 teve-se especial atenção para englobar pelo menos um período de carga alta e outro de carga baixa. Desta forma, pretendia-se não só perceber quais as diferenças das atuais condições de serviço para as de projeto, mas também quantificar a redução de necessidades de arrefecimento associadas à modulação de cargas da produção.

De modo a quantificar o impacte das medidas de redução do caudal de água do circuito AGC, foi realizado um teste³ em simultâneo com a monitorização do caudal e da energia elétrica do sistema de bombagem.

Para determinar as reduções do consumo de energia elétrica, com a implementação do variador eletrónico de velocidade, foi utilizado o *software* da ABB, *PumpSave 5.2 – Energy Saving Calculation Tool* [8]. Este *software* é disponibilizado gratuitamente na página online da empresa ABB e permite estimar a poupança associada à implementação de um VEV. Como dados de *input* do *software* é necessário conhecer dados relativos ao circuito, viscosidade do fluido e altura manométrica a garantir, assim como a curva característica da bomba. Do motor elétrico é necessário introduzir a tensão de alimentação, a potência elétrica e a eficiência. Por fim, considerou-se um perfil de operação diário de 4 horas em carga baixa e 20 horas em carga alta. Como *outputs* o programa permite estimar o consumo energético do cenário antes e após implementação do VEV, e assim a redução energética e de emissões carbónicas.

³ Dia 2 de Junho de 2014 das 15h20 às 15h30

O *software* contempla também o estudo económico da implementação do VEV, para tal é necessário introduzir algumas variáveis de carácter económico como o investimento, o tempo de vida do equipamento, o preço da energia elétrica e a taxa de juro.

Foram realizadas duas simulações para o circuito AGC, uma com as condições atuais de funcionamento, e uma segunda com condições após redução de caudal funcionamento deste circuito, definidas na análise dos permutadores de calor.

5.3.4. Resultados e Discussão

Análise do Circuito AGC

Os dados recolhidos da monitorização do circuito AGC (Figura 34), mostram que a média do caudal bombeado é de 350 m³/h em carga alta e 260 m³/h em carga baixa. Comparativamente às condições de projeto, 500 m³/h, existe uma redução de 30 % e 50 %, respetivamente. Quanto à variação da potência ativa absorvida, assumindo 97,5 kW como a potência que o grupo absorveria nas condições de projeto⁴, existe um decréscimo para 86,2 kW e 79,4 kW, respetivamente. Estas reduções de caudais correspondem apenas a 12 % e a 19 % da potência ativa de projeto, respetivamente.

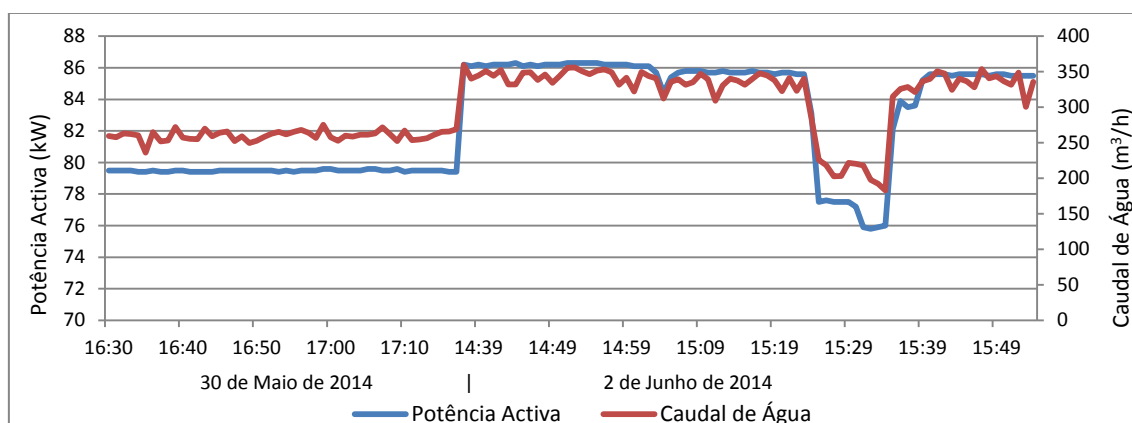


Figura 34 – Monitorização da potência ativa consumida e caudal de água do circuito AGC

As atuais condições representam reduções de carga bastante significativas que não estão a ser acompanhadas da mesma forma pela redução da potência ativa absorvida. Desta forma, a implementação de variador eletrónico de velocidade faria alterar este panorama, dado que uma redução de 20 % da carga no grupo eletrobomba, pode corresponder a uma redução de 50 % da potência absorvida. [9]

⁴ Potência ativa absorvida do grupo eletrobomba do circuito AGC que opera a 500 m³/h

Acrescendo a estas reduções de carga, caso sejam aplicadas as medidas de redução de caudal do circuito, é alcançável uma redução de 40 % do caudal atual em carga alta, que corresponde a 60 % quando comparado com as condições de projeto. Desta forma o circuito passaria a operar com apenas 205 m³/h em carga alta. Como não foi possível determinar a redução em carga baixa, para efeitos de cálculo irá considerar-se uma redução para 30 % da carga.

Nas Figuras 35 e 36 encontram-se representados os dados de entrada para a 1ª e 2ª simulações, respetivamente, e nas Figuras 37 e 38 os respetivos resultados.

System Data

Liquid density kg/m³ Static head m

Pump Data

Nominal volume flow m³/h => 138.9 l/s Efficiency

Nominal head m Max head m

Existing Flow Control

Throttling control

Motor and Supply Data

Supply voltage 380/400/415 V
Required motor power: 93.2 kW including 10% safety margin

Motor power kW

Motor efficiency ?

Operating Profile

Annual running time h

DEFAULT

0 %	=	0 h	at nom. flow
0 %	=	0 h	at 90% flow
0 %	=	0 h	at 80% flow
83.3 %	=	7297,08 h	at 70% flow
0 %	=	0 h	at 60% flow
16.7 %	=	1462,92 h	at half flow
0 %	=	0 h	at 40% flow
0 %	=	0 h	at 30% flow
0 %	=	0 h	at 20% flow

100%

Figura 35 – Dados de entrada para a 1ª simulação

System Data

Liquid density kg/m³ Static head m

Pump Data

Nominal volume flow m³/h => 138.9 l/s Efficiency

Nominal head m Max head m

Existing Flow Control

Throttling control

Motor and Supply Data

Supply voltage 380/400/415 V
Required motor power: 93.2 kW including 10% safety margin

Motor power kW

Motor efficiency ?

Operating Profile

Annual running time h

DEFAULT

0 %	=	0 h	at nom. flow
0 %	=	0 h	at 90% flow
0 %	=	0 h	at 80% flow
0 %	=	0 h	at 70% flow
0 %	=	0 h	at 60% flow
0 %	=	0 h	at half flow
83.3 %	=	7297,08 h	at 40% flow
16.7 %	=	1462,92 h	at 30% flow
0 %	=	0 h	at 20% flow

100%

Figura 36 – Dados de entrada para a 2ª simulação

Segundo a simulação realizada no *software* da ABB, com a implementação de variador eletrónico de velocidade irá reduzir-se em 40 % o consumo de energia elétrica, 220 MWh anuais, para as atuais condições de funcionamento. Se forem implementadas as medidas de redução de caudal (capítulo 3), será atingida uma redução de 70 % no consumo de energia elétrica, 330 MWh anuais. Considerando o valor de aquisição de 11.000 €, valor médio que consta no catálogo da ABB (Anexo I), e considerando um custo de energia de 100 €/MWh é espectável a obtenção de retorno do investimento ao fim de 7 meses. O VAL a 10 anos é de 150.000 €.

Para além da energia elétrica, obtém-se uma redução anual de 115 a 163 toneladas de CO₂ equivalentes, e uma possível redução de 25 % do caudal de água de recirculação do circuito ACG.

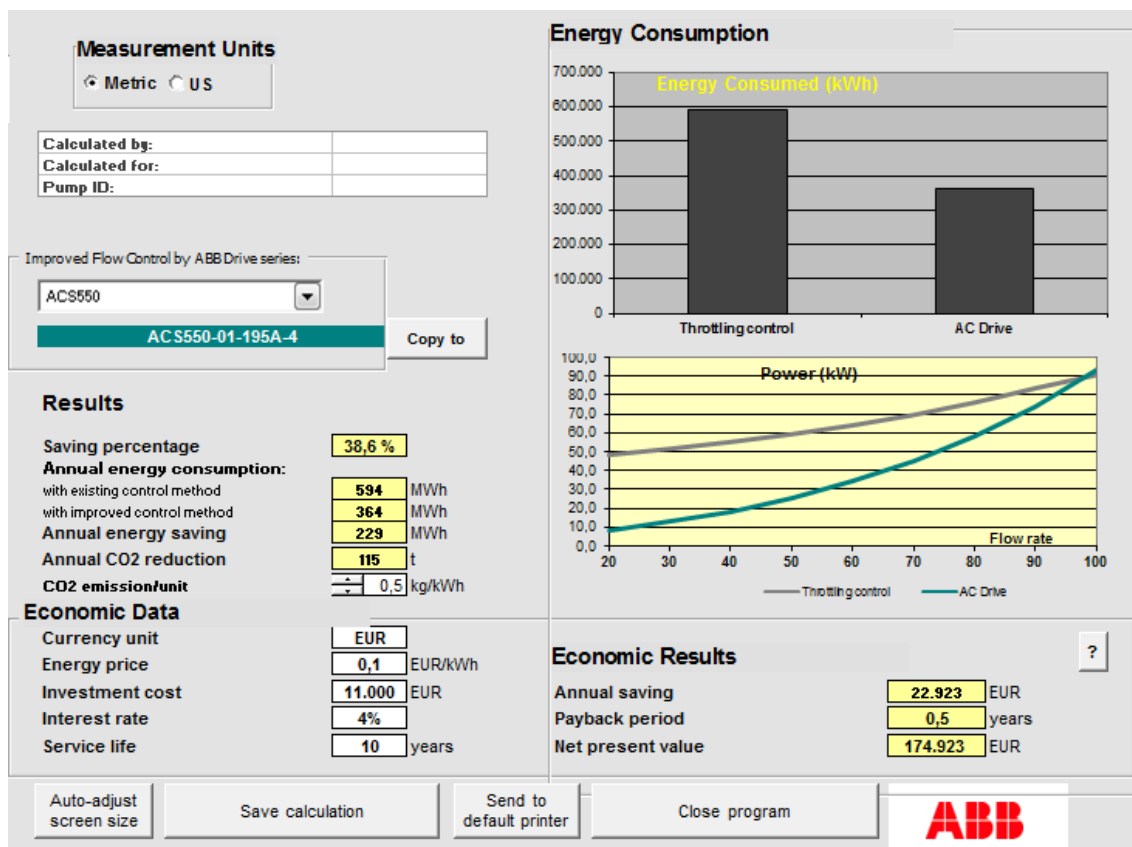


Figura 37 – Resultados da 1ª simulação

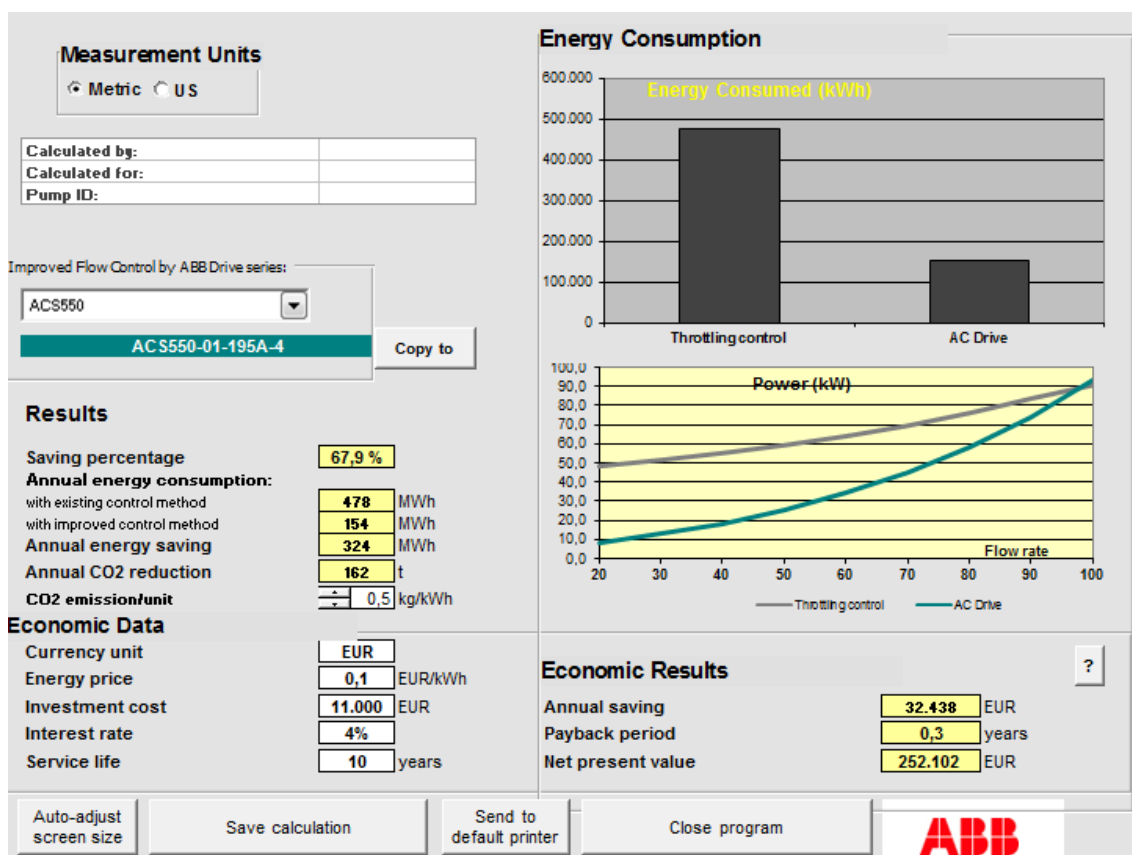


Figura 38 – Resultados da 2ª simulação

Análise do Circuito SODA

Após análise dos dados recolhidos da monitorização do circuito SODA, conclui-se que as atuais condições de funcionamento estão muito próximas daquelas para as quais o sistema de bombagem foi dimensionado. A média do caudal bombeado é de 500 m³/h em carga alta e 485 m³/h em carga baixa (Figura 39). Existe uma redução de 3 % do caudal necessário em situações de baixa produção de soda, que constitui uma margem muito pequena para intervir na redução dos consumos energéticos do sistema de bombagem. Foi realizada uma simulação para implementação de variador de frequência e, como era expectável, as poupanças conseguidas são praticamente nulas, pelo que foi excluída do estudo.

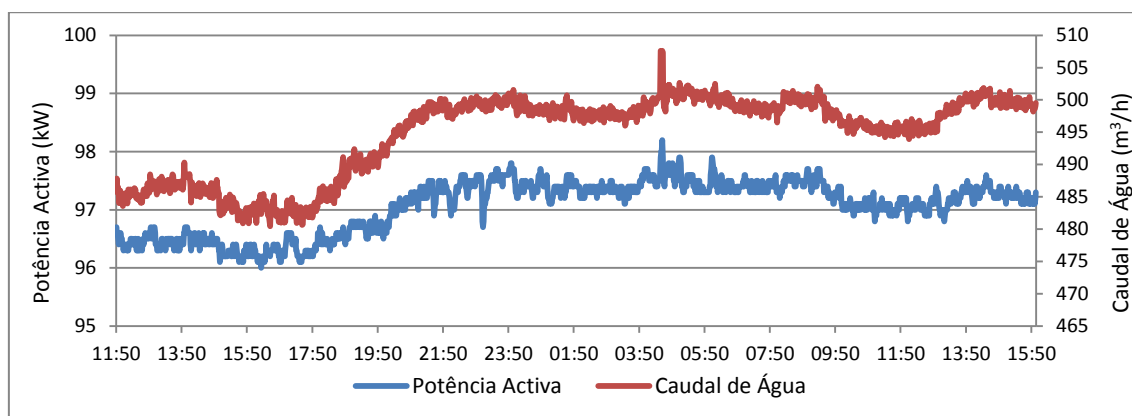


Figura 39 – Monitorização da potência ativa consumida e caudal de água do circuito SODA

5.4. Monitorização da Torre de Arrefecimento

5.4.1. Resumo

A monitorização da torre de arrefecimento é essencial para avaliar o seu estado de conservação, o seu desempenho e o potencial de redução de custos de funcionamento que este tipo de instalações possui: energia elétrica, água bruta e manutenção.

Esta medida pretende, numa primeira fase, caracterizar o atual estado de funcionamento da instalação e a origem das debilidades que vão aparecendo ao longo do tempo. Em segundo, propor medidas de minimização de consumos de energia elétrica e água bruta.

A junção destas duas fases permite a criação de uma metodologia de análise, caracterização e otimização do desempenho energético de uma instalação de arrefecimento industrial.

Apesar de não ter sido possível finalizar o estudo de impacto desta medida, por ainda estar a aguardar resposta por parte de fabricantes e fornecedores de torres de arrefecimento, será dada continuidade ao trabalho desenvolvido até ao momento, e posteriormente aplicado às restantes instalações de arrefecimento.

5.4.2. Ponto de Partida

Sendo o Refrigerante 4 a instalação de arrefecimento com o maior consumo de energia elétrica e de água bruta da fábrica cloro álcalis, a análise e monitorização da torre de arrefecimento poderá não só ter um grande impacto na melhoria da eficiência energética, como servir de projeto-piloto para a criação de uma metodologia a aplicar às restantes instalações de arrefecimento, que, na sua maioria, remontam ao mesmo ano de fabrico ou anteriores.

Através da análise das condições de desempenho dos permutadores de calor surgiu, desde logo, uma questão relacionada com o desempenho da torre de arrefecimento, onde foi perceptível que, com as atuais necessidades, haveria uma utilização exagerada dos seus ventiladores, e que para esta configuração de funcionamento dos ventiladores deveria haver um maior arrefecimento da água.

A presente tendência na indústria para a implementação de variadores eletrónicos de velocidade reforçou esta medida, não só como uma forma de reduzir consumos energéticos mas também como parâmetro capaz de caracterizar o desempenho da torre de arrefecimento, tornando possível a análise comparativa com valores do passado.

Com uma monitorização contínua da instalação e um historial de registos é possível antever problemas, e desta forma gerir da melhor maneira os recursos disponíveis e o seu funcionamento.

5.4.3. Caracterização e Metodologia

Sendo o objetivo principal deste estágio a análise do consumo de energia elétrica e de água bruta desta instalação, a primeira abordagem incidiu na análise das condições de funcionamento e desempenho da torre de arrefecimento. Sendo um processo de arrefecimento evaporativo, um dos fatores preponderantes é o ar atmosférico. Foram definidas as condições climatéricas da zona de Estarreja, com base nos valores recolhidos pela estação meteorológica da CUF-QI, e a forma como evoluem diária e anualmente. Com esta informação é possível cruzar dados e averiguar qual o impacto das condições climatéricas no desempenho da torre de arrefecimento, e verificar se os balanços relativos às perdas por evaporação fecham, tentando justificar o elevado consumo de água bruta (*make up*) observado.

Inerente ao consumo de água bruta está a necessidade de efetuar uma purga contínua da bacia da torre de arrefecimento para garantir valores de concentração de sais minerais e de condutividade abaixo dos limites definidos. Este controlo é feito manualmente, havendo assim a possibilidade de implementar sistemas automatizados, que seriam, à partida, melhores opções do ponto de vista da minimização do consumo de água bruta.

Através de uma inspeção visual exterior da torre de arrefecimento constatou-se que a dispersão e queda de água em cada uma das células não era uniforme e na mesma quantidade (Figura 40). Era visível da parte inferior de cada célula que o enchimento se encontrava deteriorado, faltando mesmo partes deste (Figura 41). Era também perceptível, não só a nuvem de vapor de água que saía pelo topo dos ventiladores, mas também a água que caía em redor da instalação, análoga a chuva.

Foi pedido a duas empresas externas, fabricantes e comercializadoras de torres de arrefecimento, um parecer técnico sobre estas questões e ambas afirmaram que o enchimento necessitava de ser substituído, assim como os separadores de gotas, que impedem o arrasto de partículas de água pelos ventiladores.

Por fim foi, monitorizado o consumo energético de cada um dos ventiladores com o intuito não só de os comparar entre si, detetando algumas anomalias, mas também para recolha de informação para uma possível análise futura da implementação de variador eletrónico de velocidade.



Figura 40 – Distribuição da queda de água



Figura 41 – Estado de conservação do enchimento

5.4.4. Resultados e Discussão

A falta de rendimento da torre de arrefecimento poderá, em grande parte, justificar-se pela deterioração do enchimento. É no enchimento que ocorrem as trocas térmicas entre a água e o ar atmosférico, e se este estiver em mau estado, colmatado com lamas e/ou outras partículas, a troca térmica será dificultada tendo de haver compensação por parte dos ventiladores, que funcionarão durante mais tempo em simultâneo. No entanto, só após a substituição do enchimento é que se concluirá que esta é a razão do consumo excessivo de energia elétrica e da perda de rendimento da instalação.

Relativamente ao consumo de água bruta, analisando o dado de 2013 (Figura 42), conclui-se que o *make up*, o diferencial de arrefecimento e a evaporação teórica variam em simultâneo, aproximadamente com a mesma relação percentual de acréscimo e decréscimo. No entanto, os valores da evaporação teórica face ao *make up*, no início do ano, têm um desfasamento de aproximadamente 3 m³/h. Este valor corresponde às restantes perdas da torre de arrefecimento: arrasto de água pelos ventiladores e purga, sendo que o arrasto é desprezado por ser mínimo, ou deveria ser no caso de uma torre a operar nas melhores condições.

Comparando os valores de Junho e Novembro, percebe-se que existe uma incoerência de resultados. Para os mesmos valores de evaporação teórica, registaram-se desfasamentos de 5 m³/h em Junho e 2 m³/h em Novembro. Visto que o caudal de purga deveria ser o mesmo para a mesma evaporação, significa que o controlo da purga não está a ser monitorizado da melhor forma, e que o arrastamento poderá estar a ocorrer em demasia.

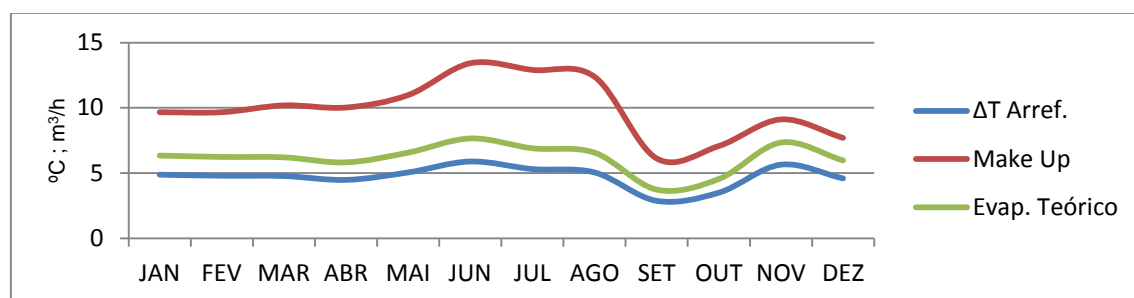


Figura 42 – Monitorização das condições de funcionamento da torre de arrefecimento em 2013

Segundo os relatórios das empresas solicitadas, o estado de conservação do enchimento e o seu desempenho estão bastante afetados recomendando a substituição do mesmo. Desta forma, acredita-se que o desempenho da torre irá melhorar, satisfazendo as atuais necessidades com menos horas de funcionamento dos ventiladores, e com menor consumo energético

Também é recomendada a substituição dos separadores de gotas, reduzindo as perdas de água por arrasto e prolongando o estado de conservação dos motores e ventiladores. Esta água promove não só a corrosão destes equipamentos que são os mais expostos, mas também de todos os outros que se encontram em redor da torre.

Da monitorização do consumo de cada um dos ventiladores (Figura 43, 44, 45 e 46), conclui-se que existem dois ventiladores, 1 e 4 a funcionarem no mesmo regime de potência, 13,2 kW, o ventilador 3 nos 12,9 kW e o ventilador 2 nos 12,5 kW. Conclui-se também que em pleno funcionamento estão sempre três ventiladores e um que entra ou sai de funcionamento consoante as necessidades, ventilador 2.

Nestes arranques, o ventilador 2 atinge picos de potência de 45 kW, quase quatro vezes superior à potência em normal funcionamento. Estes picos de arranque podem ser eliminados com a implementação de arrancadores suaves ou de variadores eletrónicos de velocidade, preservando o bom funcionamento dos motores e suavizando o consumo de energia elétrica associado ao período de arranque.

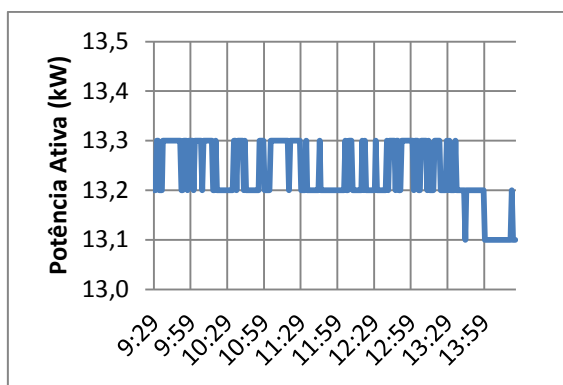


Figura 43 – Monitorização Ventilador 1

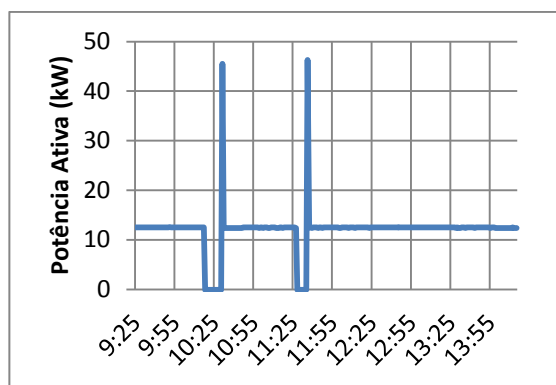


Figura 44 – Monitorização Ventilador 2

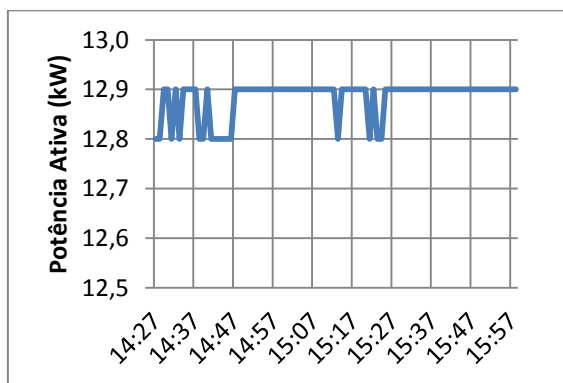


Figura 45 – Monitorização Ventilador 3

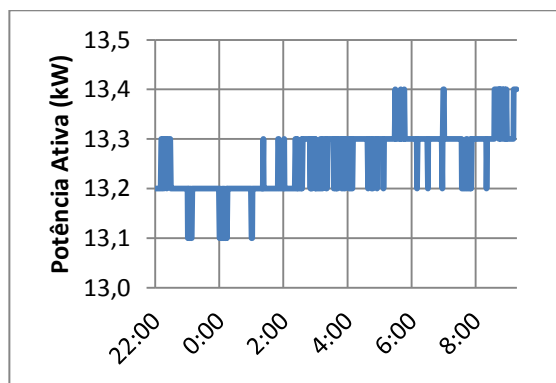


Figura 46 – Monitorização Ventilador 4

A implementação de variador eletrónico de velocidade traria diversas vantagens como a redução de consumo energético e a monitorização das condições de funcionamento da torre de arrefecimento.

Relativamente ao consumo energético, com o VEV todos os ventiladores passariam a operar em conjunto, mas a uma frequência inferior; desta forma, é possível manter os requisitos atuais quando operam só três ventiladores, mas com um consumo energético inferior.

Quanto à monitorização, com a substituição do enchimento a torre de arrefecimento tem forçosamente de obter níveis de desempenho semelhantes aos de projeto. Se as necessidades atuais são inferiores às de projeto, a necessidade de ventilação será inferior. Desta forma, com o VEV reduzia-se a velocidade de todos os ventiladores até ao mínimo necessário para satisfazer as necessidades. Este valor seria registado e monitorizado, passando a ser o principal meio de monitorização do desempenho da torre de arrefecimento. Quanto mais o enchimento estiver colmatado/degradado maior velocidade o sistema precisará de ter nos ventiladores, para compensar o aumento das perdas de carga e das perdas de rendimento.

Com esta monitorização, e futuramente com os registos de vários anos, poderá ser criada uma metodologia em que, para cada patamar de velocidade, haverá uma ação de manutenção a desencadear, e quando atingido um determinado valor máximo, será necessário proceder à substituição do enchimento. A nível de planeamento de manutenção será uma mais-valia, por ser possível antever e antecipadamente programar intervenções, manutenção preventiva.

6. Conclusões

A instalação de arrefecimento industrial, alvo de auditoria energética, foi identificada como objeto de estudo por ter o potencial de poupança mais elevado em energia elétrica, água e manutenção, visto ser responsável pelo consumo de 30 % da energia elétrica e 43 % da água bruta das cinco instalações de arrefecimento.

Com a análise das condições de funcionamento da instalação de arrefecimento concluiu-se que as necessidades atuais de caudal de recirculação são, num dos circuitos, inferiores em 30 % às condições de projeto e poderá chegar a uma redução de 60 %. Com a auditoria energética realizada foram propostas medidas de eficiência energética, que satisfazem os objetivos estabelecidos inicialmente:

- Reduzir o consumo de energia elétrica e de água bruta
- Otimizar os circuitos de arrefecimento
- Criar metodologia para análise de torres de arrefecimento
- Garantir o bom funcionamento e eficiência energética dos permutadores de calor

As medidas propostas foram:

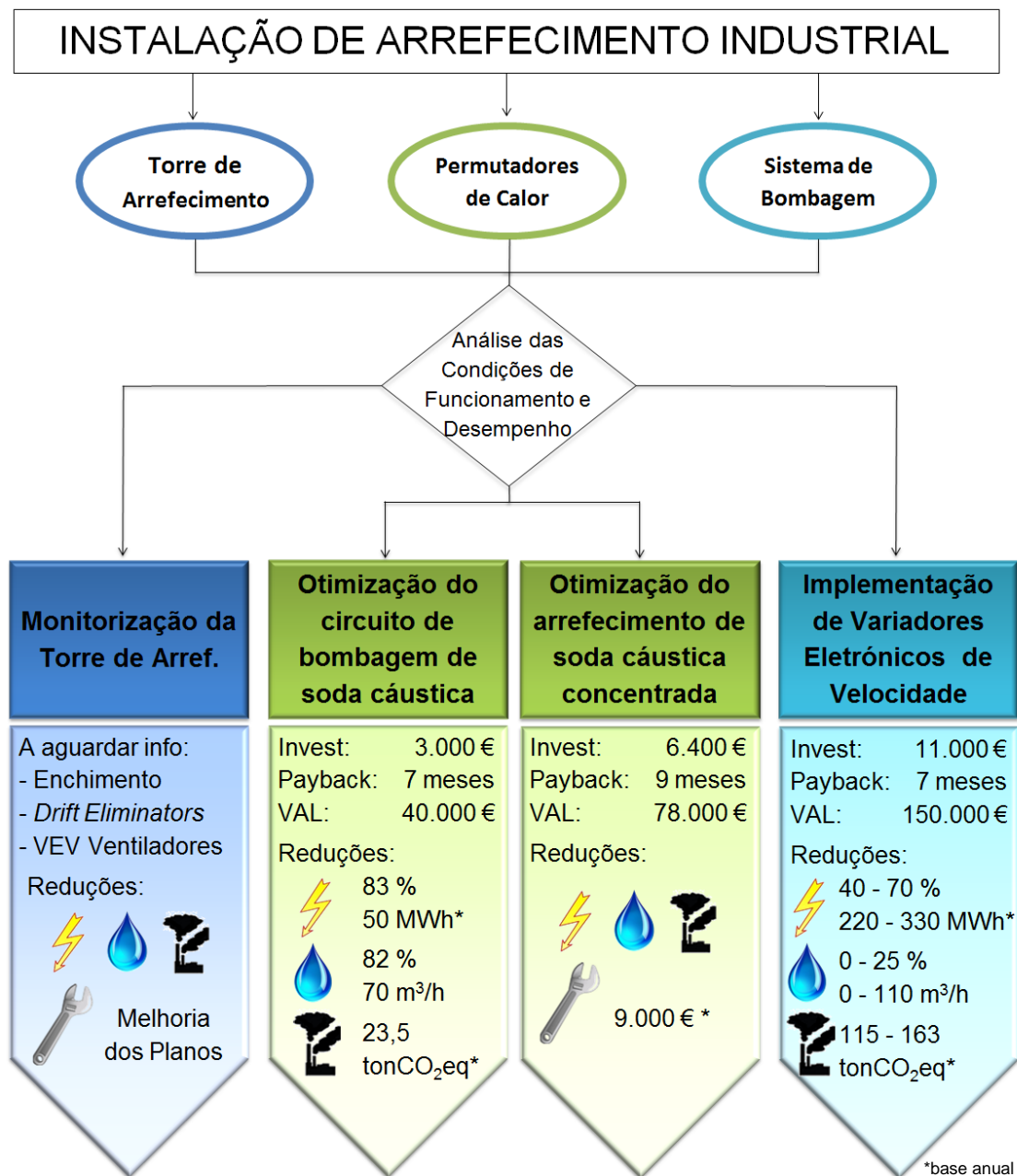
1. Otimização do circuito de bombagem de soda cáustica
2. Otimização do arrefecimento de soda cáustica concentrada
3. Implementação de variadores eletrónicos de velocidade
4. Monitorização da torre de arrefecimento

Todas as medidas são economicamente viáveis, com um *payback* inferior ao máximo admitido pela empresa. Para além das reduções diretas de consumo de energia elétrica e de água bruta, melhoram o desempenho da instalação, reduzem/evitam intervenções para manutenção e prolongam o tempo de vida útil dos equipamentos (Figura 47).

Pretende-se, futuramente, que a metodologia para monitorização da torre de arrefecimento seja finalizada e melhorada, e passível de ser implementada nas restantes instalações de arrefecimento.

Como trabalho futuro, considera-se interessante a realização de um estudo dos consumos da torre de arrefecimento comparativamente a um aeroarrefecedor, balanceando o aumento dos custos de energia elétrica, com a redução do consumo de água bruta.

Todas as medidas propostas pretendem alinhar os “processos secundários”, que muitas vezes são descurados, com a atual política de eficiência energética através da sensibilização, monitorização e melhoria tecnológica.



Alinhar os “processos secundários”, muitas vezes descurados, com a atual política de eficiência energética através da sensibilização, monitorização e de melhorias tecnológicas.

Figura 47 – Resumo dos resultados das medidas propostas

7. Bibliografia

1. Medidas de Eficiência Energética Aplicáveis à Indústria Portuguesa: Um Enquadramento Tecnológico Sucinto, ADENE-Agência para a Energia, Lisboa, (2010).
2. *Cooling Towers*, Book III - Energy Efficiency in Electrical Utilities, Bureau of Energy Efficiency, India, (2005).
3. W22 - Motores elétricos trifásicos, Catálogo Técnico WEG.
4. CHEREMISINOFF, N. P.; CHEREMISINOFF, P. N., *Cooling towers: selection, design, and practice*. Ann Arbor Science Publishers, Michigan, (1981).
5. Bhatia, A., *Cooling Towers*, Curso M07-001. Continuing Education and Development Engineering, Nova Iorque, (2014)
6. *Adjustable Speed Drives As Applied To Centrifugal Pumps*. Publicação D-7737 Rockwell International Corporation, EUA, (2000).
7. COSTA, V. A. F., *Transporte e Armazenamento de Energia*. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2014.
8. Software ABB, "PumpSave 5.2 - Energy Saving Calculation Tool". [Online]. Disponível: <http://new.abb.com/drives/software-tools/pumpsave> [Acedido em 16-Jun-2014]
9. ESPADINHA, J., *Como economizar energia através da variação de velocidade*, Xperience Efficiency - Schneider-Electric, Maio de 2014, Lisboa.

ANEXO I – Catálogo de Variadores Eletrônicos de Velocidade ABB